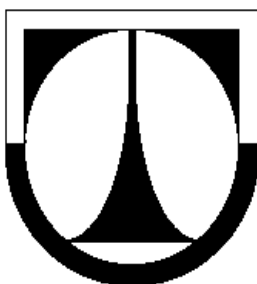


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA MECHATRONIKY, INFORMATIKY

a
mezioborových studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MĚŘENÍ PŘECHODOVÉHO DĚJE PŘI VYPNUTÍ 3F TRANSFORMÁTORU

TRANSIENT PHENOMENA DURING TRANSFORMER SWITCH-OFF

MEASUREMENT

JAN KAZDA

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D. Liberec, 2011

Konzultant práce: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KAZDA**
Osobní číslo: **M07000022**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Měření přechodového děje při vypnutí 3f transformátoru**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

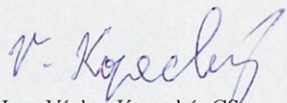
Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte literární rešerši dostupné literatury zabývající se měření magnetických toků při vypínání transformátorů.
2. Seznamte se s principem nepřímého měření magnetického toku uzavřeného magnetického obvodu z indukovaného napětí.
3. Připravte automatizované testy pro měření vypnutí transformátoru za různých podmínek:
 - a) vypnutí stykačem,
 - b) vypnutí programovatelným zdrojem s vnuceným průběhem napětí při vypínání.Měření třífázového transformátoru proveďte pro skupinová zapojení Yy, YNy, Dy, Yd. Měření bude prováděno jako opakované s odpovídajícím zpracováním naměřených hodnot.

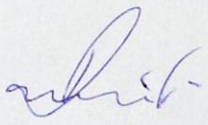
Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: cca 35–40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] Petrov G. N.: Elektrické stroje 1, Úvod - Transformátory. 3. dopl. vyd. Praha: Academia, 1980. 388 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Kubín, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2010
Termín odevzdání bakalářské práce: 20. května 2011


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Petr Tůma, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 15. října 2010

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne:

Podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mi pomáhali s vypracováním bakalářské práce, především svému vedoucímu, panu Ing. Miroslavu Novákovi, PhD., který mi udílel cenné rady a připomínky a který mě po celou dobu zpracovávání zadání vedl jejími úskalími. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mě podporovala a stála při mně po celou dobu studia, i když to kolikrát nebylo jednoduché.

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na měření a popsání přechodového jevu a remanentního toku, který vznikne při vypnutí transformátoru v závislosti na úhlu rozepnutí obvodu, počáteční magnetizaci jednotlivých částí jádra a skupinovém zapojení. V první řadě je měřeno na jednofázovém transformátoru pro pochopení a popsání principů a poté s třífázovým pro pochopení složitějších principů, vzájemně se ovlivňujících jevů, odehrávajících se uvnitř transformátoru.

Cílem práce je sestavení grafů přechodových jevů v závislosti na úhlu rozepnutí. Toto se bude měřit při různých způsobech napájení primárního vinutí a při různých typech zátěže na straně sekundární.

Veškerá měření budou prováděna pomocí programu napsaného v programu MatLab, ve kterém budou také posléze naměřené výsledky vyhodnocovány a zpracovávány.

Klíčová slova:

třífázový transformátor, jednofázový transformátor, přechodový jev, remanentní tok, remanentní indukce, vypínací charakteristiky

Abstract

The bachelor work is specialized at measuring and describing of transient phenomena and residual flux, which begin on switch-off of transformer in depend on angle of disconnecting circuit, initial magnetization of separate parts of core and group connecting. Primarily is measure at one-phase transformer because of understanding and description of principle and after that will be use the three-phase transformer because of understanding more complication principles of interacting phenomenon which are inside of transformer.

The targets of this work are making graphs of transient phenomena in depend of angle of switching-off. This will be measuring with different supply voltage of primary winding and different loading at secondary part.

Every measuring will be made by platform writing in MatLab in which will be eventually measured data analyses and compiled.

Keywords:

one-phase transformer, three-phase transformer, transient phenomena, residual flux, residual induction, switch-off characteristics

Obsah

Prohlášení	4
Poděkování.....	5
Anotace	6
Abstract.....	7
 Obsah	 8
Seznam použitých symbolů a zkratk	10
1. Úvod	11
2. Teoretický rozbor	11
2.1. Magnetismus.....	11
2.1.1. Magnetické materiály	11
2.1.2. Intenzita magnetického pole	17
2.1.3. Magnetická indukce	17
2.1.4. Indukované napětí	18
2.1.5. Remanentní tok	19
2.1.6. Remanentní indukce	19
2.2. Měření přechodového jevu.....	20
2.2.1. Metoda s použitím RC integrátoru a osciloskopu.....	20
2.2.2. Metoda s použitím PC.....	22
3. Praktická část	23
3.1. Jednofázový transformátor	23
3.2. Měření jednofázového transformátoru	27
3.2.1. Vypnutí prog. zdrojem Kikusui – transformátor naprázdno.....	27
3.2.2. Vypnutí pomocí stykače – transformátor naprázdno.....	30
3.2.3. Vypnutí pomocí stykače - R zátěž ($R=50\Omega$)	33

3.2.4.	Vypnutí pomocí stykače - RL zátěží ($R=45\Omega$, $L=33\text{mH}$)	35
3.2.5.	Vypnutí pomocí stykače – s usměrňovačem ($R=100\Omega$, $F=440\mu\text{F}$)	38
3.3.	Měření třífázového transformátoru.....	41
3.3.1.	Napájení program. zdrojem Chroma – zapojení YNy	43
3.3.2.	Napájení program. zdrojem Chroma – zapojení YNyn	45
3.3.3.	Napájení z elektrické sítě – zapojení Dyn	46
3.3.4.	Napájení z elektrické sítě – zapojení Yd.....	54
3.3.5.	Napájení z elektrické sítě – zapojení Yyn.....	60
3.3.6.	Napájení z elektrické sítě – zapojení YNyn	66
4.	Závěr	73
	Použitá literatura	75
	Citace	76
	Seznam obrázků.....	77
	Obsah příloženého DVD.....	80

Seznam použitých symbolů a zkratk

U	V	napětí
I	A	proud
R	Ω	odpor
C	F	kapacita
L	H	indukčnost
μ_0	H/m	permeabilita vakua ($\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$ H/m)
μ_R	-	poměrná permeabilita
B	T	magnetická indukce
B_R	T	remanentní indukce
H	A/m	elektromagnetická intenzita
H_S	A/m	nasycená elektromagnetická intenzita
H_C	A/m	elektromagnetická koercitivita
\emptyset	Wb	magnetický tok
\emptyset_R	Wb	remanentní tok
T	K	termodynamická teplota
M	A/m	magnetický moment
V	m ³	objem
s	m ²	průřez jádra
N	-	počet závitů
u_i	V	indukované napětí
t	s	čas
τ	s	časová konstanta integrátoru

trf(TRF)	transformátor
3f(3F)	trojfázový
HS	hysterezní smyčka
_0	zapojení naprázdno (pro 3f měření)
_R	zapojení se zátěží (pro 3f měření)

1. Úvod

Problematika vypínání transformátorů je stejně zásadní jako jejich spínání. V obou případech dochází k výkyvům napětí a proudovým špičkám, které zatěžují jak rozvodnou soustavu, samotný transformátor, tak i obvody na sekundární straně. Tyto „neduhy“ jsou však závislé na více faktorech – fáze vypnutí, magnetizace jádra, sycení jádra, remanentní indukce, remanentní tok aj. V této práci se budeme věnovat chování obvodu při vypnutí, kdy budeme měřit průběhy napětí, proudu a magnetického toku a na závislosti chování přechodového jevu budeme sestavovat mapy vypínacích charakteristik, které nám budou vypovídat o chování transformátoru při vypnutí v závislosti indukce na fázi vypnutí a také na typu zátěže.

Práci jsem si rozdělil do dvou částí, z nichž v první části budu měřit tuto problematiku na jednofázovém transformátoru z důvodu jednoduchého magnetického obvodu bez zásadního ovlivňování měřených hodnot navzájem.

V části druhé budu již měřit s třífázovým transformátorem, kde se již hodnoty budou měnit v důsledku složitějšího magnetického obvodu, kde se veličiny mezi jednotlivými obvody zásadně ovlivňují.

2. Teoretický rozbor

2.1. *Magnetismus*

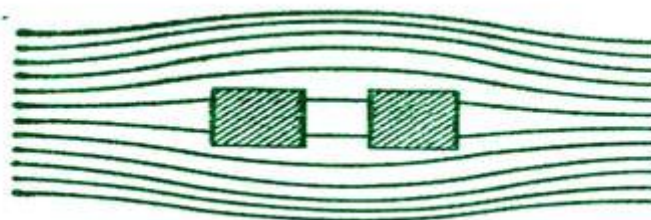
2.1.1. Magnetické materiály

2.1.1.1. Diamagnetické

Materiály, jež mají všechny své spinové a dráhové (orbitální) magnetické momenty ve všech atomech (iontech) vykompenzovány. Při nepřítomnosti vnějšího magnetického pole neexistují v materiálech dipóly a nevytváří se žádné magnetické pole. Naopak při působení vnějšího magnetického pole se deformují orbitály a vznikají slabé indukované dipóly, které vytváří slabé magnetické pole, jež má smysl polarizace opačný, než je směr polarizace u pole vnějšího. Při tomto jevu dojde ke vzájemnému ode-

čtení obou magnetických polí a výsledné pole v diamagnetiku je nepatrně zeslabeno, z čehož vyplývá to, že diamagnetikum je vytlačováno z oblasti magnetického pole.

Relativní permeabilita μ_r těchto materiálů je nezávislá na H i T a je v rozmezí hodnot ($0 < \mu_r < 1$).

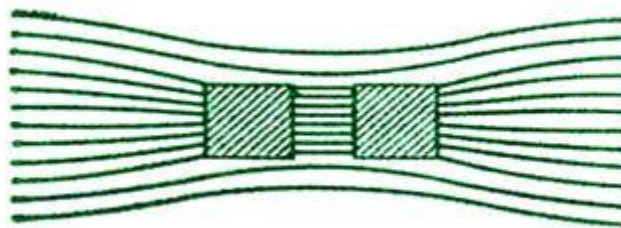


Obr. 1 - Diamagnetický materiál v magnetickém poli [5]

2.1.1.2. Paramagnetické

Materiály, jež nemají všechny své spinové a dráhové (orbitální) magnetické momenty ve všech atomech (iontech) vykompenzovány. Všechny materiály s těmito vlastnostmi mají tím pádem všechny atomy magnetickými dipóly. Při nepřítomnosti vnějšího magnetického pole jsou v látce jeho magnetické dipóly chaoticky rozmístěné. Tyto směry působení se však vzájemně vykompenzovávají, takže navenek se jeví materiál jako magneticky neutrální. Naopak při působení vnějšího magnetického pole dojde k uspořádání všech dipólů do směru působení vnějšího magnetického pole, díky čemuž výsledné pole v tomto materiálu nepatrně zesiluje a paramagnetikum je vtahováno do oblasti magnetického pole.

Relativní permeabilita μ_r těchto materiálů je nezávislá na H , ale závislá T (Curie-rova teplota – teplota, při jejímž překročení se paramagnetický materiál stane diamagnetickým) a je nepatrně větší než 1 ($\mu_r > 1$).



Obr. 2 - Paramagnetický materiál v magnetickém poli [5]

2.1.1.3. Feromagnetické

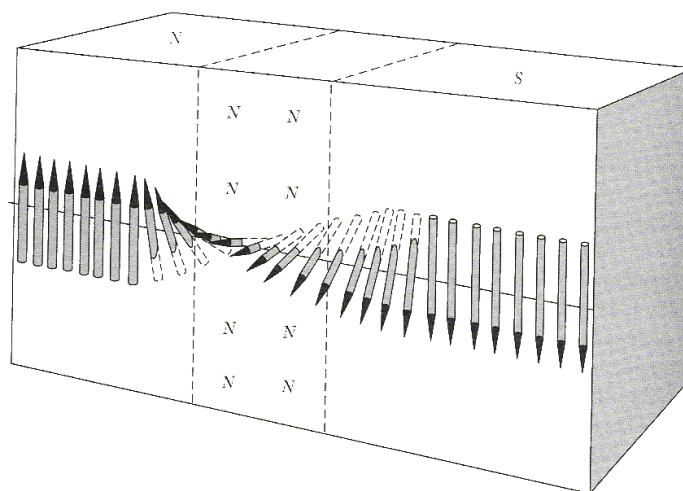
Látky, které vykazují spontánní magnetismus – tzn., že i v nepřítomnosti vnějšího magnetického pole vykazují nenulovou magnetizaci. Tato je dána vztahem,

$$\vec{M} = \frac{(\sum \vec{m})}{V} \quad [A/m; Am^2, m^3], \quad (2.1)$$

kde \vec{m} představuje magnetické dipóly obsažené v látce vztažené na jednotkový objem látky.

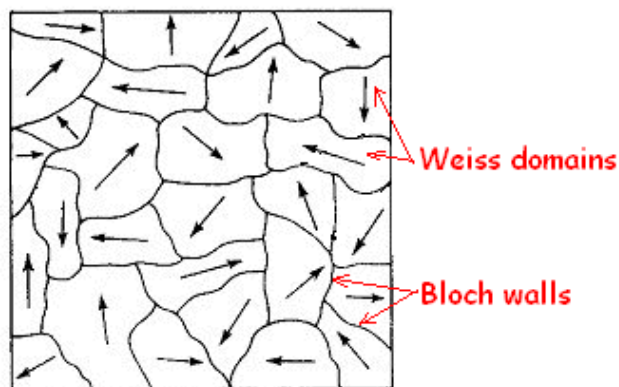
Blochova stěna:

- Změna směru magnetizace při přechodu z jedné domény do druhé se neděje jedním skokem, ale je spojitě rozdělena na větší počet atomových rovin
- Mezi sousedícími spontánně zmagnetovanými oblastmi tím vzniká přechodová vrstva, v níž se vektor magnetizace vytáčí ze směru, který zaujímal v jedné doméně a spojitě přechází do dalšího shodného směru, v němž leží magnetizace druhé domény
- Energie, která je potřebná k tvorbě doménové stěny, tím snižuje celkovou magnetickou energii materiálu



Obr. 3 - Princip Blochovy stěny [11]

- Weissova doména:
- Nenulová magnetizace v nepřítomnosti vnějšího magnetického pole (spontánní magnetizace) je dána spontánním uspořádáním magnetických spinových momentů (dipólů) jednotlivých paramagnetických atomů (tj. atomy s nevykompenzovanými vnitřními d nebo f-orbitaly) uvnitř malých částí krystalu
 - Uspořádání v doméně je důsledkem vzájemného působení spinů (\Rightarrow výměnné síly – čistě kvantově-mechanický jev) sousedních paramagnetických atomů, které jsou uspořádány ve specifické krystalové mříži (tzv. krystalová struktura magnetické mřížky, resp. magnetických podmřížek)



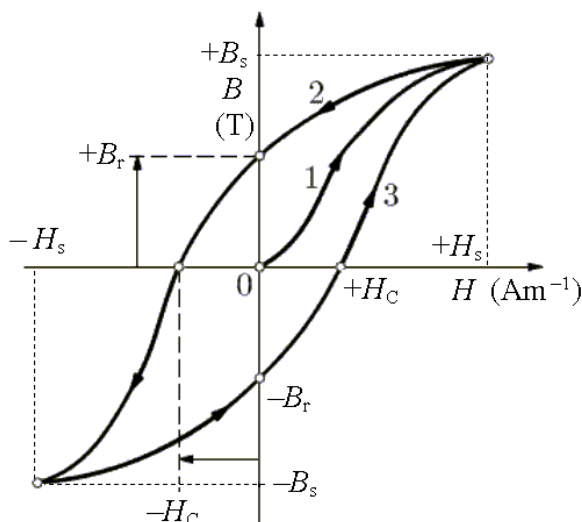
Obr. 4 - Weissovy domény (vektory) se znázorněnými Blochovými stěnami [12]

2.1.1.4. Hysterezní smyčka (proces přemagnetování)

Snížování intenzity vnějšího magnetického pole z nasycené hodnoty H_s zpátky do nulové a poté do záporných hodnot (opačný směr intenzity vnějšího magnetického pole) se nevrací po téže křivce (prvotní magnetizace), ale probíhá po křivce poněkud posunutě doleva. Totéž se projeví při opětovném zvyšování intenzity vnějšího magnetického pole ze záporné nasycené hodnoty $-H_s$ opět do kladné nasycené hodnoty H_s - tentokrát bude křivka posunuta poněkud doprava od prvotní magnetizace. Vznikne tedy hysterezní křivka charakterizující daný fero- nebo ferimagnetický materiál. Hystereze je způsobena nevratným (ztrátovým) dodáváním energie (práce) na přemagnetování materiálu, tedy na přetočení všech magnetických spinových momentů v materiálu.

Plocha hysterezní smyčky tedy představuje hysterezní ztráty, tj. energii vynaloženou na přetáčení mag. dipólů.

- **Vratné (pružné) děje** sice energii v první části cyklu pohltí, ale v následné části cyklu ji ve stejné velikosti vrátí.
- **Nevratné (nepružné) děje** energii pohltí, ale už ji zpátky nevrátí, při návratu do původního stavu naopak pohltí další energii (práci) => ztráty (např. hysterezní ztráty) [14]



Obr. 5 - Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu [5]

K popisu hysterezní smyčky si vezmeme Obr. 5. Zde jsou vyznačeny základní jevy čísla 1-3. V 1) dochází k prvotní magnetizaci. Zde se intenzita vnějšího magnetického pole H zvyšuje z 0 do $+H_s$. Poté dosáhnutí tohoto jevu je materiál saturovaný a posléze dochází k ději označenému číslem 2). Zde dochází k přemagnetování magnetického materiálu a intenzita vnějšího magnetického pole se snižuje z $+H_s$ do $-H_s$. Při následném připojení dojde k opětovnému vzrůstu intenzity vnějšího magnetického pole H z dobu $-H_s$ opět do bodu $-H_s$ a tím pádem i k opětovnému přemagnetování. V případě střídavého elektrického proudu se tyto jevy stále opakují a tato křivka je neustále opísána.

Charakteristické veličiny hysterezní křivky:

- remanence – remanentní magnetická indukce ($\pm B_r [T]$):

Indukce, která zůstane v materiálu při snížení magnetické intenzity vnějšího pole na nulovou hodnotu ($B_r \approx 0,7-1T$).

- koercitivita – koercitivní magnetická intenzita ($\pm H_c [Am^{-1}]$):

Intenzita vnějšího magnetického pole potřebná ke zrušení zbytkové magnetické indukce ($H_c > 28 Am^{-1}$).

- *tvar křivky ovlivňuje:*

Chemické složení a stav krystalové mřížky, což souvisí s technologickým zpracováním (válcováním za studena, za tepla, žíhání, kalení).

- *vzrůstu magnetizace lze docílit:*

- změny objemů jednotlivých zón (domén)
- změny směrů spontánní magnetizace
- změny velikosti spontánní magnetizace

2.1.2. Intenzita magnetického pole

Vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje „mohutnost“ magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí (např. velikost elektrického proudu tekoucího vodičem cívky) a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Ve vakuu je intenzita magnetického pole definována vztahem

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_r \mu_0} [Am^{-1}; T, -]. \quad (2.2)$$

Význam této veličiny vynikne zejména při studiu magnetického pole v látkovém prostředí. Pro intenzitu magnetického pole v solenoidu dostaneme

$$\vec{H} = \vec{i} \frac{NI}{l} [Am^{-1}; A, -, A, m]. \quad (2.3)$$

Pro znázornění tohoto pole lze použít obdobu magnetických indukčních čar, a to magnetické siločáry (orientované prostorové křivky, jejichž souhlasně orientovaná tečna, v kterémkoliv jejím bodě, má směr vektoru intenzity magnetického pole \vec{H}).

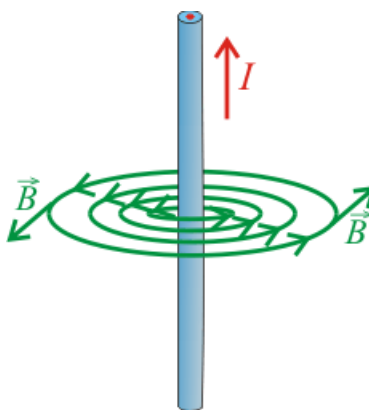
2.1.3. Magnetická indukce

Fyzikální veličina vyjadřující silové účinky magnetického pole na částice s nábojem nebo magnetickým dipólovým momentem.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} [T; Hm^{-1}, Am^{-1}] \quad (2.4)$$

$$B = \mu \frac{NI}{l} [T; Hm^{-1}, A, m] \quad (2.5)$$

Velikost magnetické indukce ovlivňuje velikost protékajícího proudu, použitý magnetický materiál (železo, vzduch, vakuum), počet závitů a délka vodiče protékajícího proudem I .



Obr. 6 - Princip magnetické indukce [13]

2.1.4. Indukované napětí

Při vypnutí transformátoru se v rozpojovaném vinutí indukuje jisté napětí u_i , které se přes magnetické jádro naindukuje i do dalších vinutí (2.5). Toto napětí vykazuje průběh přechodového jevu, který je závislý na úhlu odepnutí od sítě. Toto ovlivňuje velikost špičky naindukovaného napětí

$$u_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -N \frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (2.6)$$

Toto napětí poté odeznívá v přechodovém ději až do úplného vymizení. Spolu s tímto jevem však vznikají v jádru transformátoru i další jevy. V závislosti na napětí se mění magnetický tok Φ v jádře, který ovlivňuje magnetizaci jádra a tím pádem i indukci B , která přibližně kopíruje tvar křivky procházejícího proudu.

2.1.5. Remanentní tok

Remanentní (zbytkový) tok je definován podmínkami v transformátoru ve chvíli, kdy došlo k předchozímu vypnutí transformátoru. Tento remanentní tok je ovlivněn více faktory, jako například: charakter materiálu jádra, přítomnost vzduchových mezer v jádře, svodová kapacita mezi vinutími, charakter proudu při rozepnutí obvodu a přítomnost kapacit nebo rozvodných sítí připojených k transformátoru.

Tok v jádře a následný remanentní tok mohou být získány integrací napětí (2.1), pro každou fázi těsně před a v průběhu vypínání transformátoru, jehož charakteristika závisí na proměnných uvedených výše. Správný odhad remanentního toku je velice důležitý pro správnou strategii řízeného spínání; nicméně remanentní tok definuje bod na napěťové křivce, v jakém musí být spínač sepnut.

$$\Phi_R = \int_{t_0}^t u_i dt \quad (2.7)$$

Tento vztah vychází ze vztahu (18).

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \Phi = \int_{t_0}^t u_i dt \quad (2.8)$$

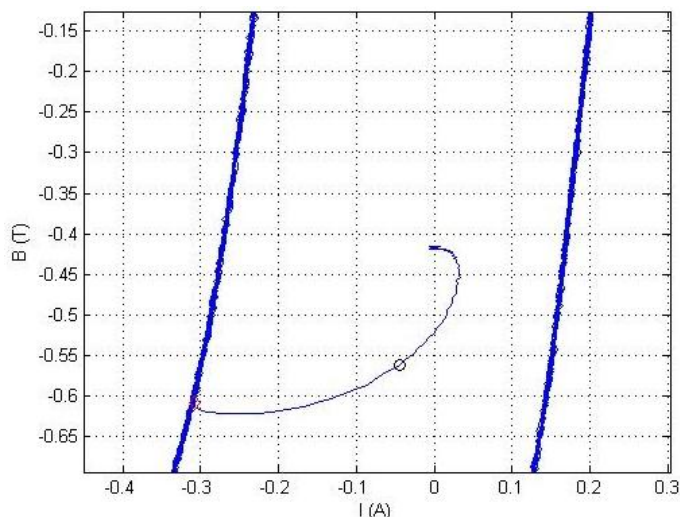
Pro výpočet remanentního toku se musí dodržet následující kroky:

- musíme vycházet z posledních n period diskrétního napěťového průběhu
- u těchto bychom měli určit průchody nulou
- výpočet remanentního toku se musí zahájit po průchodu nulou prostřednictvím integrace napětí
- měla by být použita korekce posunutí vypočteného toku – proto je výpočet zahájen od nuly [8]

2.1.6. Remanentní indukce

Velikost B_R záleží na typu magnetického obvodu a jeho materiálu. Čím méně vzduchových mezer mezi jednotlivými plechy v něm je, tím větší remanentní indukce. Její velikost a smysl záleží hlavně na typu zapojení. Čím vyšší napětí na vstup přivede-

me, tím větší bude remanentní indukce. Remanentní indukce, coby charakteristika použitého magnetického materiálu, přibližně udává třídy ocelí používaných v moderních transformátorech.



Obr. 7 - Zobrazení remanentní indukce u hyst. smyčky

Remanentní indukce v železe je jeden z nejproblematictějších parametrů. Mimo to B_R značně souvisí s kvalitou magnetického jádra a jeho hodnot (které se časem mohou měnit). Také se nedá nijak změřit přímo jako například vzdálenost, proud, aj. Pokud jej přesto chceme nějakým způsobem zjistit, je nutno použít speciální vybavení a měřící procedury a výpočty. [9]

Na základě velikosti B_R dělíme materiály na magneticky měkké a tvrdé.

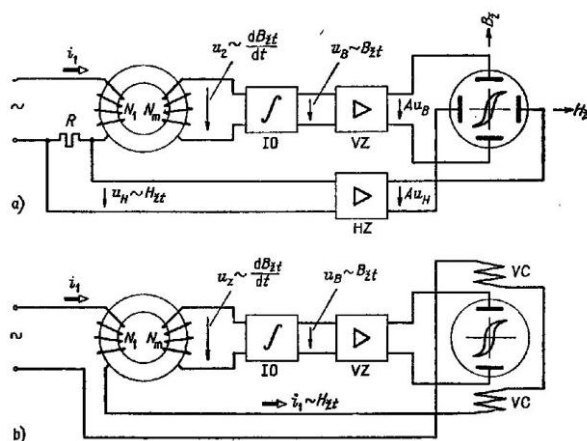
2.2. Měření přechodového jevu

2.2.1. Metoda s použitím RC integrátoru a osciloskopu

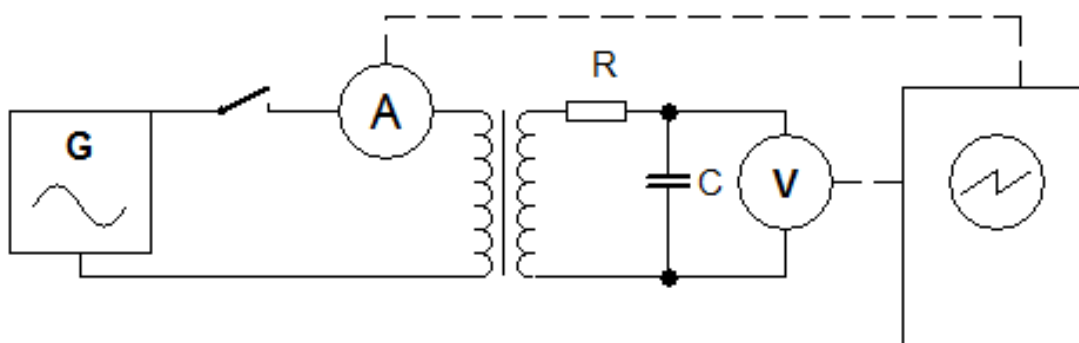
Dříve se pro měření používalo zapojení složené ze zdroje sinusového napětí, měřeného transformátoru osciloskopu k zobrazení a klasického RC integračního článku, který sloužil k zaznamenání napěťové špičky a vzniklých přechodových dějů a jejich následnému zobrazení na obrazovce osciloskopu. Tento RC článek plnil funkci integraci napětí dle vztahu (2.1). Toto zapojení však nebylo ideální, jelikož se zde uplatnily chyby

vzniklé tolerancemi použitých součástek v RC členu a proto, že práce s osciloskopem nebyla příliš pohodlná. Mimo jiné zde byl problém v přesnosti měření i proto, že v použitém RC integrátoru byl neodstranitelný svodový odpor na kondenzátoru. Nao-pak velké plus bylo v jednoduchosti tohoto zapojení.

Přímo pro měření této problematiky byly určeny přístroje, tzv. feroграфы, které obsahovaly krom zmíněného integračního RC obvodu i obrazovku, na které se zobrazovala hysterezní smyčka měřeného ferromagnetického obvodu. Tento přístroj lze použít pro měření, jak uzavřeného, tak otevřeného obvodu, pouze za jisté úpravy měřicího obvodu (Obr. 8). V těchto feroграфech se dosahovalo požadované přesnosti měření změnou velikosti odporu R (Obr. 8 a)). [10]



Obr. 8 - Zapojení feroграфů – a) otevřené i uzavřené vzorky, b) pouze uzavřené vzorky [10]



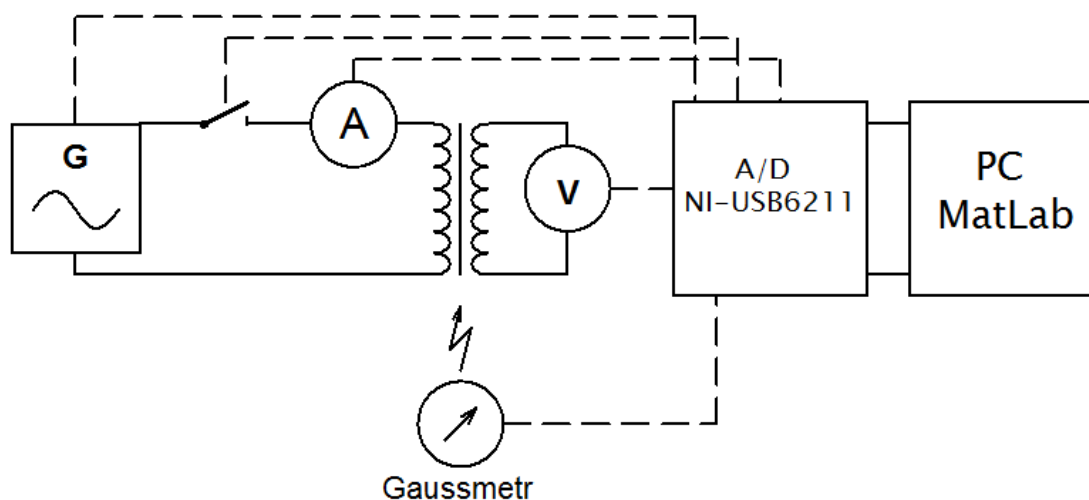
Obr. 9 - Verze měřicího obvodu s použitím RL a osciloskopu

2.2.2. Metoda s použitím PC

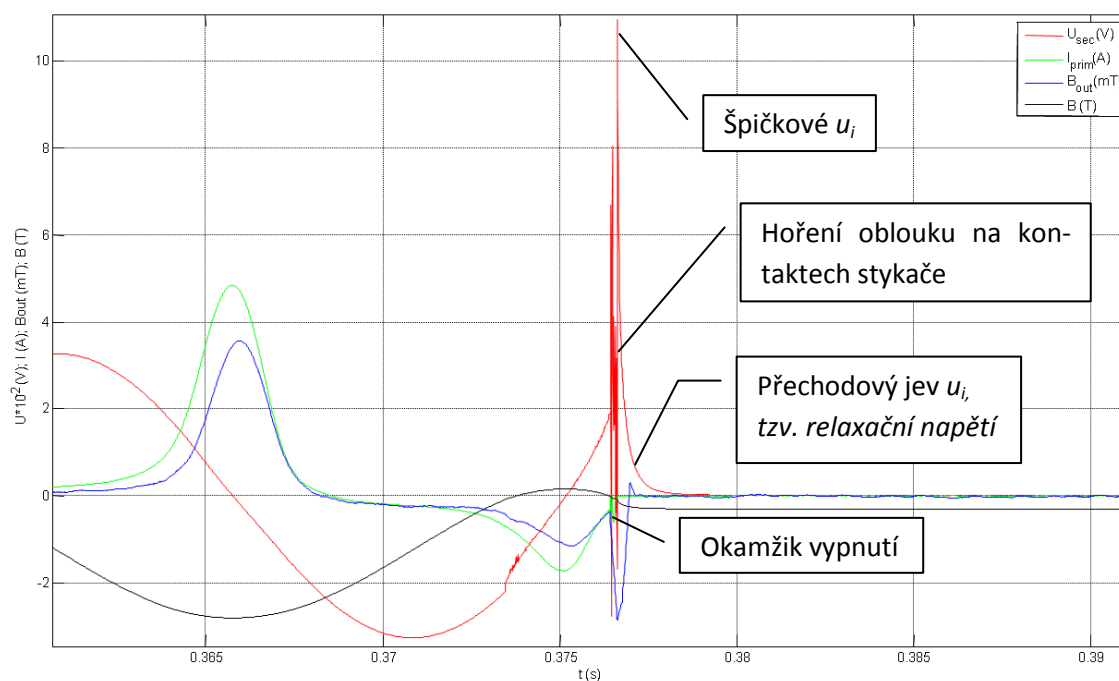
Novější metoda se v principu od předcházející (viz 2.2.1) téměř neliší. I tato metoda je založena na integraci sekundárního napětí. Avšak toto probíhá již sofistikovaně, pomocí specializovaných programů v počítači. Samotné zapojení měřícího obvodu se tak skládá z programovatelného AC zdroje, ampérmetru měřícího proud protékající primárním vinutím transformátoru, měřeného transformátoru a voltmetru měřícího sekundární napětí. Do této chvíle jsou zapojení totožná, avšak integrace je realizována v PC, kterému předchází A/D měřící karta, na jejíž vstupy jsou připojeny ampérmetr, voltmetr a gaussmetr (Obr. 11). Celé zapojení a zpracování měření zajišťují specializované programy určené pro měření hysterezní smyčky a vlastností použitého magnetického jádra (Obr. 10).

Klady tohoto zapojení spočívají v tom, že lze ze změřených hodnot kdykoli vypočít požadované hodnoty a v tom, že odpadá nutnost analogového integračního členu, a tudíž nám odpadá problém se svodovým odporem kondenzátoru a tím pádem určením správné konstanty τ . Nevýhoda ovšem spočívá ve složitosti nastavení offsetu A/D převodníku.

Pokud měříme s programovatelným zdrojem, který má koncovou část realizovanou jako výkonový zesilovač, je nutné zařadit do obvodu klasický stykač, jelikož koncový stupeň vnutí násilně na výstupu nulu, a také odvede proud z transformátoru. Tento režim neodpovídá používaným zapojením transformátorů v praxi. Z toho důvodu byl do obvodu vřazen stykač, který provádí vlastní vypnutí transformátoru. Tímto způsobem se simulují reálné podmínky při vypnutí.



Obr. 10 - Nová verze měřícího obvodu



Obr. 11 - Měřené veličiny a jejich průběhy s vyznačenými důležitými body

3. Praktická část

3.1. Jednofázový transformátor

Měření bylo prováděno s jednofázovým transformátorem, který měl oddělená vinutí z důvodu měření magnetického toku co nejblíže jádra, pomocí gaussmetru. Cel-

kové zapojení se tak sestávalo z měřeného transformátoru, gaussmetru, klešťového ampérmetru, voltmetru a programovatelného napájecího zdroje Kikusui PCR2000LA. Tyto byly připojeny k 16 bitovému A/D převodníku firmy National Instruments USB 6211, který naměřené hodnoty poskytoval programu v PC (Obr. 14).

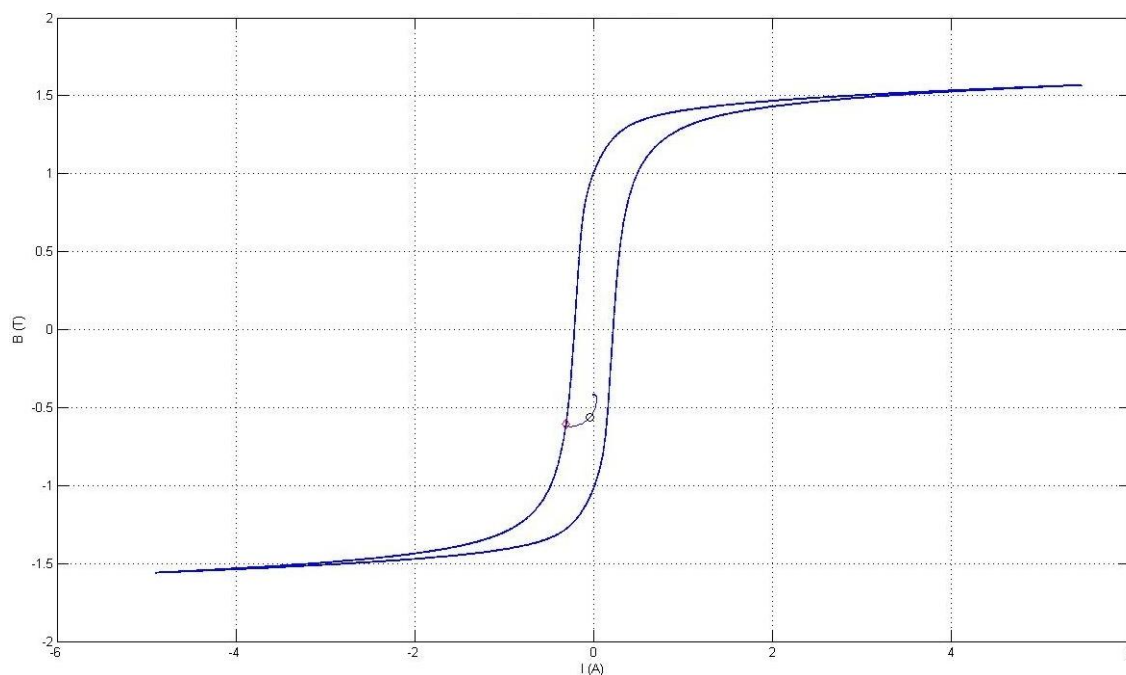
Princip měření spočíval v tom, že se sepnul programovatelný zdroj, počkal po dobu nutnou k ustálení přechodového děje, který vznikl při připnutí transformátoru do sítě, poté se sbírala data, a po jisté době se zdroj vypnul. Během měření došlo k zachycení několika čistých period, které posloužily posléze k dopočítání remanentního toku. Zaznamenával se primární proud, sekundární napětí a magnetický tok. Tyto průběhy však byly nepřesné z důvodu offsetu A/D převodníku, který se musel z daných průběhů vypočítat. Z naměřeného magnetického toku se vypočítala magnetická indukce a tato se vykreslila do grafu namísto magnetického toku. Také se ukázalo problémem nedokonalé vypnutí zdroje, jelikož jeho koncová část pracuje na způsobu výkonového zesilovače, a tudíž nedošlo k čistému přechodovému jevu, jelikož koncové tranzistory sloužily jako zátěž pro „vybití“ přechodového jevu a tento byl zkreslený (viz 3.1.1.). Proto bylo nutno použít stykač, který obvod přerušil natvrdo, avšak s hořením oblouku mezi kontakty během rozepínání, což pro měření nepředstavovalo takový problém (viz 3.1.2.). Po naměření požadovaných hodnot došlo k vyhodnocení v programu Matlab. Zde se srovnaly offsety naměřených hodnot, provedl se přepočet magnetického toku na magnetickou indukci ze známého průřezu jádra pomocí vzorce

$$B = \frac{\Phi}{S} [T; Wb, m^2]. \quad (3.1)$$

Z těchto průběhů se určil moment, kdy došlo k vypnutí obvodu a kdy došlo k hoření oblouku na kontaktech stykače. Po zhasnutí oblouku se zde projeví znatelný přechodový jev indukovaného napětí u_i , který se postupně blíží k nulové hodnotě (24).

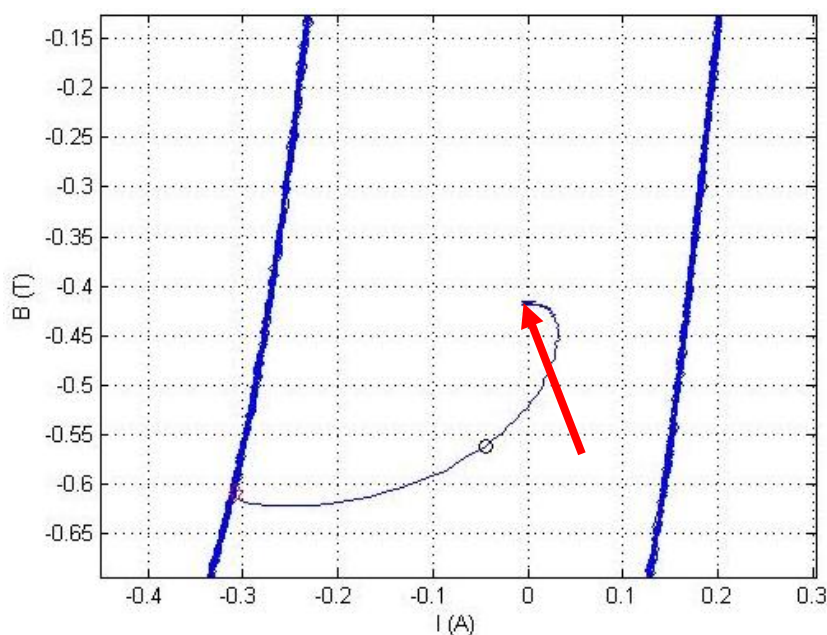
$$u_i(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} [V; V, s, \Omega, F] \quad (3.2)$$

Dále byla spočítána intenzita magnetického pole H (2.8), kterou bylo nutno vypočíst z důvodu sestavení hysterezní křivky daného transformátoru (Obr. 12).



Obr. 12 - Měřená hysterezní křivka

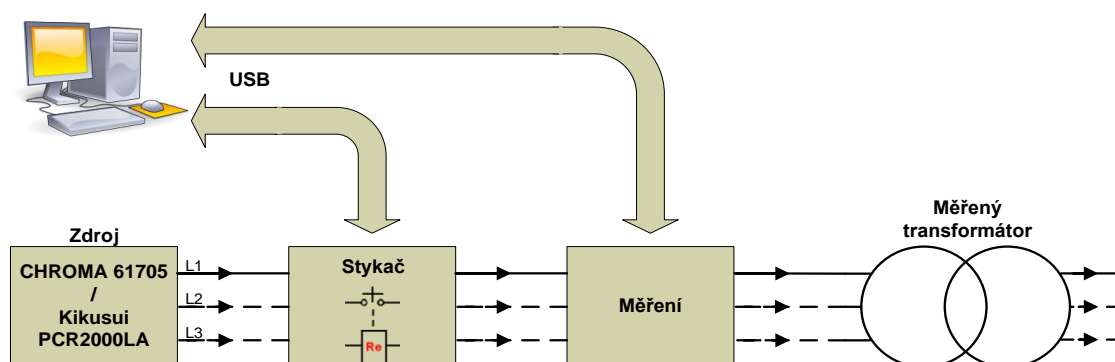
Jelikož je tento magnetický obvod sestaven z materiálu, který má magnetickou hysterezi, se po vypnutí zachovala jistá hodnota magnetické indukce, která se měřila a na vykreslené hysterezní smyčce se zobrazuje jako výběžek s koncem kdekoliv uvnitř hysterezní smyčky na ose $x=0$ (Obr. 12). To znamená, že si obvod po vypnutí elektrického obvodu, zachovává nějakou remanentní. Z tohoto důvodu je dobré před dalším měření tento obvod demagnetizovat – tj. přivést na nulovou hodnotu, aby byly podmínky pro všechna měření stejné (u našeho měření toto není třeba, jelikož nás zajímá chování při vypnutí a nikoli při sepnutí). Dále se při rozepnutí v maximálním proudu indukuje patřičné u_i v protifázi.



Obr. 13 - Detail remanentní indukce na hysterezní křivce po vypnutí

Nás zajímaly tyto hodnoty ve vztahu vůči danému fázovému posuvu vůči síťovému napětí, jelikož se magnetická indukce v transformátoru zastaví při rozepnutí obvodu v jiné fázi na jiné remanentní indukci. Z těchto naměřených a vypočtených hodnot z opakovaných měření jsme sestavili graf remanentní magnetické indukce, který nám ukazuje, kdy je nejideálnější doba vypnutí daného transformátoru a při jaké fázi vůči síťovému napětí. Tyto hodnoty se liší pro rozdílné zátěže a jejich charakter na sekundárním vinutí a částečně i pro různé způsoby rozepínání obvodu. Dále tyto grafy ukazují, kdy došlo k rozpojení obvodu stykače a kdy opravdu k vypnutí obvodu došlo po uhašení oblouku na kontaktech stykače a jaká byla výsledná remanentní indukce. Okamžiky vypnutí jsou vynášeny jako fázový úhel vzhledem k průběhu napájecího napětí transformátoru. Okamžiky rozpojení obvodu a uhašení oblouku jsou značeny na vypínacích charakteristikách (např. Obr. 18) červenými a modrými značkami, kde červené značky znázorňují dobu povelu k vypnutí a modře kdy došlo k zhasnutí oblouku a rozepnutí obvodu. Menší odchylky mezi červeným a modrým průběhem v oblasti kolen (např. Obr. 34) jsou způsobeny tím, že transformátorem teče magnetizační proud. Části charakteristik rovnoběžné s osou x jsou způsobené tím, že došlo k rozepnutí v momentě, kdy se magnetický obvod nacházel ve stavu, kdy byla okamžitá hodnota indukce vyšší než maximální remanentní indukce jádra, tj. blízko saturace hysterezní smyčky.

Blokové schéma měření jedno(tří)fázového transformátoru



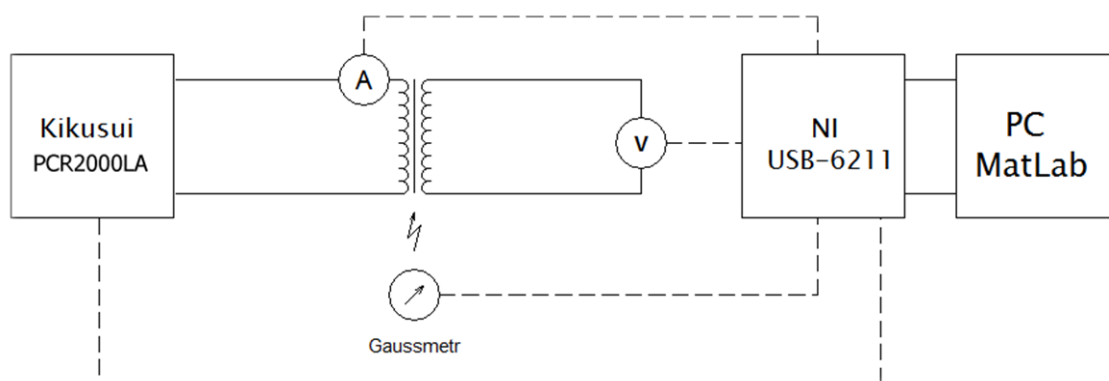
Obr. 14 - Blokové schéma měřícího obvodu

3.2. Měření jednofázového transformátoru

3.2.1. Vypnutí prog. zdrojem Kikusui – transformátor naprázdno

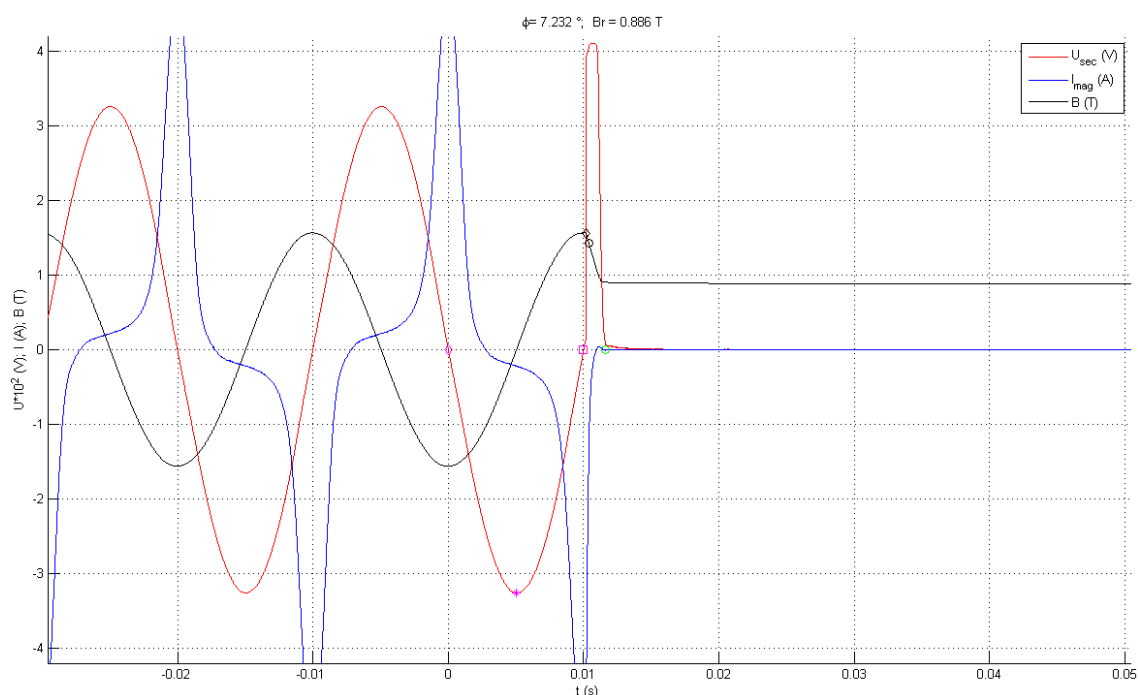
V tomto zapojení jsme použili programovatelný zdroj Kikusui PCR2000LA, který jsme řídili pomocí programu napsaného v prostředí MatLab. Tento program komunikoval s periferií pomocí A/D měřící karty od firmy National Instruments NI-USB6211. K této kartě byly připojeny ještě klešťový ampérmetr, voltmetr a gaussmetr, jehož sonda byla dána k samotnému jádru transformátoru, aby byl naměřený magnetický tok co nejpřesnější. V kleštinách ampérmetru bylo navinuto 10 závitů pro zlepšení využití rozsahu ampérmetru.

Měření probíhalo tak, že jsme zapnuli zdroj, počkali na ustálení hodnot a průběhů a poté vypnuli zdroj. Avšak několik okamžiků před vypnutím zdroje došlo ke sběru měřených hodnot, aby se zaznamenaly průběhy jak ustálených hodnot, tak i samotné chování obvodu při rozeznutí, kdy dojde k indukovaní napětí a proudové špičce (Obr. 16).



Obr. 15 - Zapojení pro zapojení naprázdno s rozeznutím zdroje

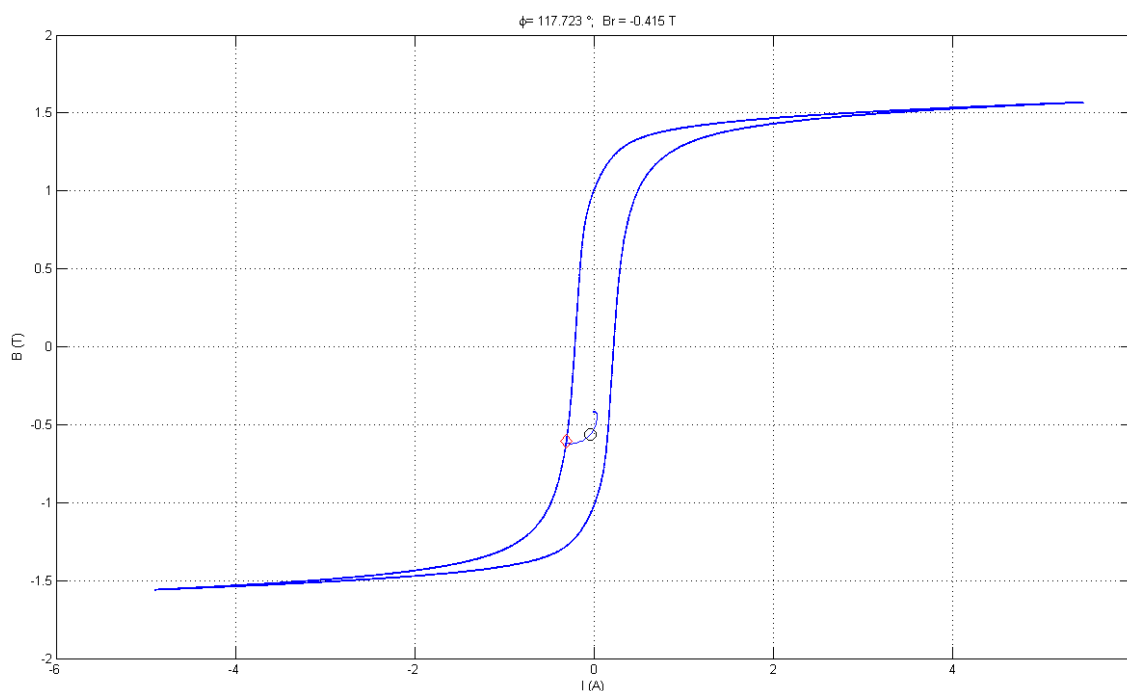
Celkem jsme takto změřili 360 průběhů, které jsme uložili do samostatných souborů, které jsme posléze vyhodnotili a získali tak požadované výsledky. V první řadě jsme zobrazili naměřené hodnoty graficky, abychom viděli průběhy hodnot. Z magnetického toku jsme pomocí vzorce (2.7) vypočítali odpovídající magnetickou indukci B , kterou jsme potřebovali pro další výpočty.



Obr. 16 - Naměřené průběhy – vypnutí zdroje naprázdno

Ze známé magnetické indukce a magnetizačního proudu jsme vytvořili hysterezní smyčku (Obr. 17). Na této křivce si lze povšimnout „ocásku“, který trčí uvnitř smyčky. Jedná se o následky vypnutí obvodu, kdy se v magnetickém obvodu akumuluje

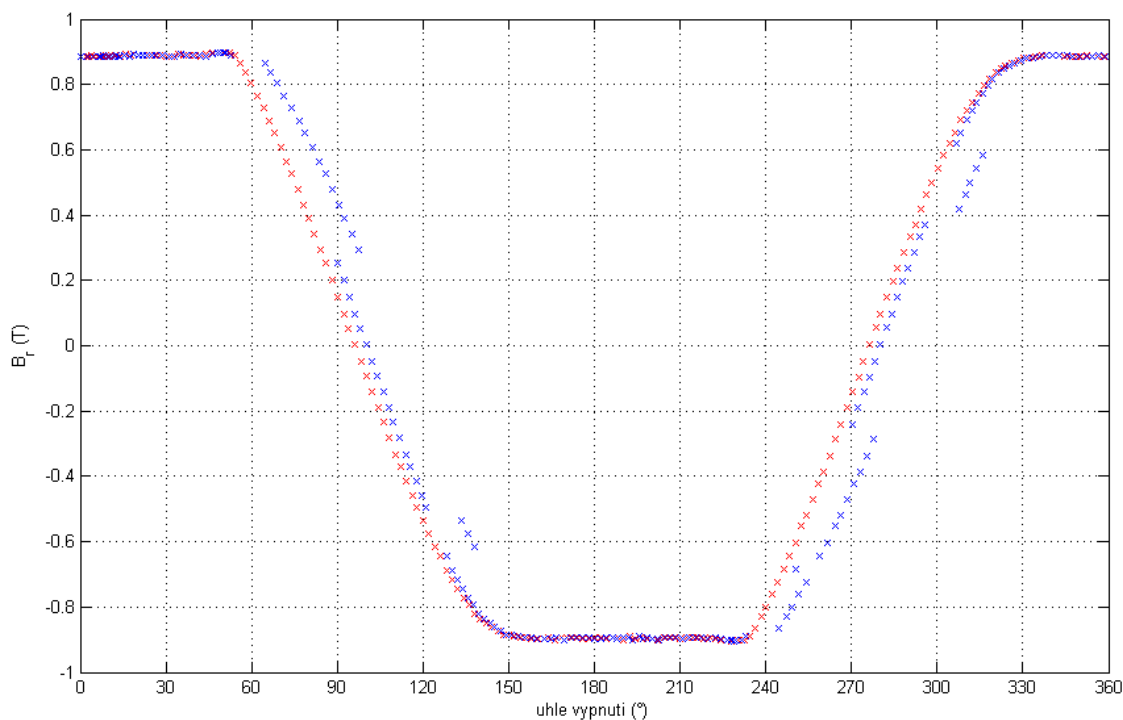
remanentní indukce, která se zastaví na hodnotě odpovídající konečné remanentní indukci obvodu.



Obr. 17 - Hysterezní smyčka – vypnutí zdrojem naprázdno

Na Obr. 18 vidíme již naměřenou charakteristiku remanentní indukce transformátoru v závislosti na fázovém úhlu vypnutí. Tato charakteristika nám znázorňuje, kdy je optimální doba pro vypnutí obvodu, aby se nám neindukovalo při rozepnutí obvodu velké napětí a proud. Tyto oblasti se nachází tam, kde je výsledná remanentní indukce nulová.

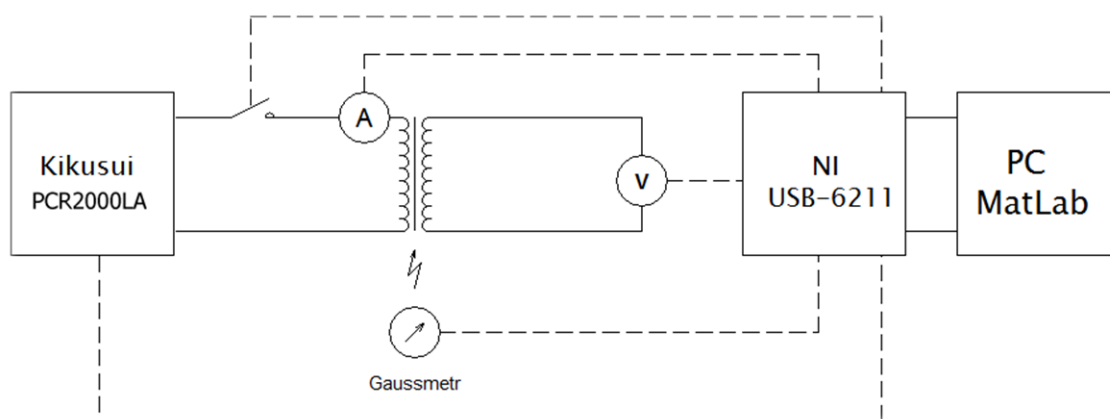
Tyto hodnoty však bylo nutno upravit tak, aby nedocházelo k příliš velkým odskokům jednotlivých bodů či skupin bodů mimo pomyslnou křivku. Tyto odskoky vznikaly chybou v určení doby rozepnutí obvodu a také tím, že transformátorem teče jistý magnetizační proud.



Obr. 18 - Vypínací mapa pro vypnutí pomocí zdroje naprázdno

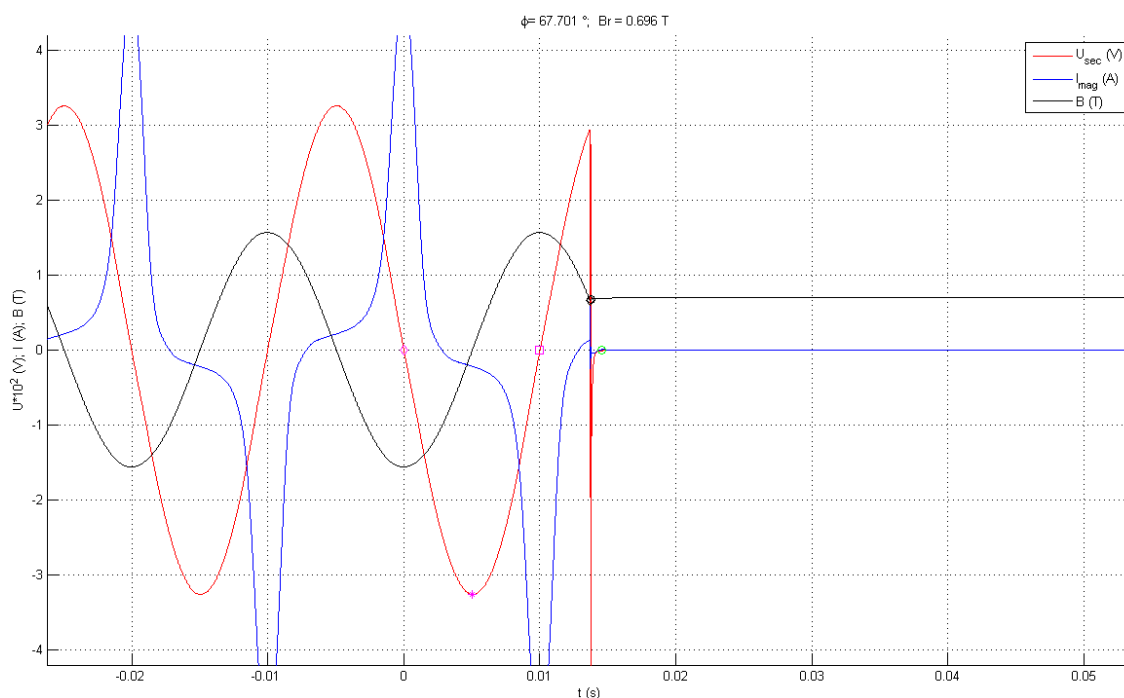
3.2.2. Vypnutí pomocí stykače – transformátor naprázdno

Tento obvod se podstatně neliší od výše uvedeného (3.2.1). Pouze z důvodu problémů s vypínáním obvodu, jelikož zdroj vypnul příliš tvrdě – tj. vnutil násilně nulové napětí. Nesimuloval tak chování sítě a navíc fungoval jako zátěž, jelikož pohlcovал energii z transformátoru. Proto bylo nutno zařadit do obvodu před transformátor stykač, který zajistí rozepnutí obvodu (Obr. 19). Tento způsob vypínání transformátorků menších výkonů (<100 kVA) je také v praxi nejvíce používán. U tohoto řešení dochází při rozepínání kontaktů stykače k hoření oblouku, při kterém obvodem stále teče proud. Tento jev se objeví na naměřených průbězích tak, že při vypnutí obvodu došlo k zákrmitům, které odezněly po zhasnutí oblouku. Při zvětšení křivky si lze všimnout i nehladkosti průběhu při hoření oblouku.

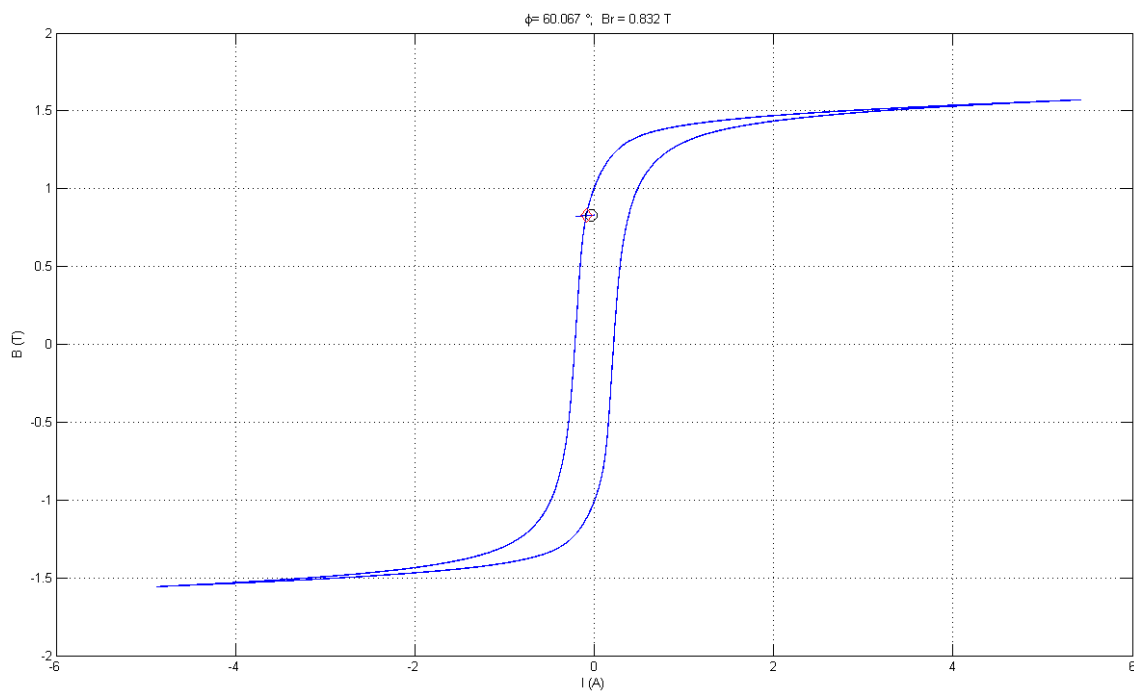


Obr. 19 - Zapojení pro zapojení naprázdno s rozepnutím stykačem

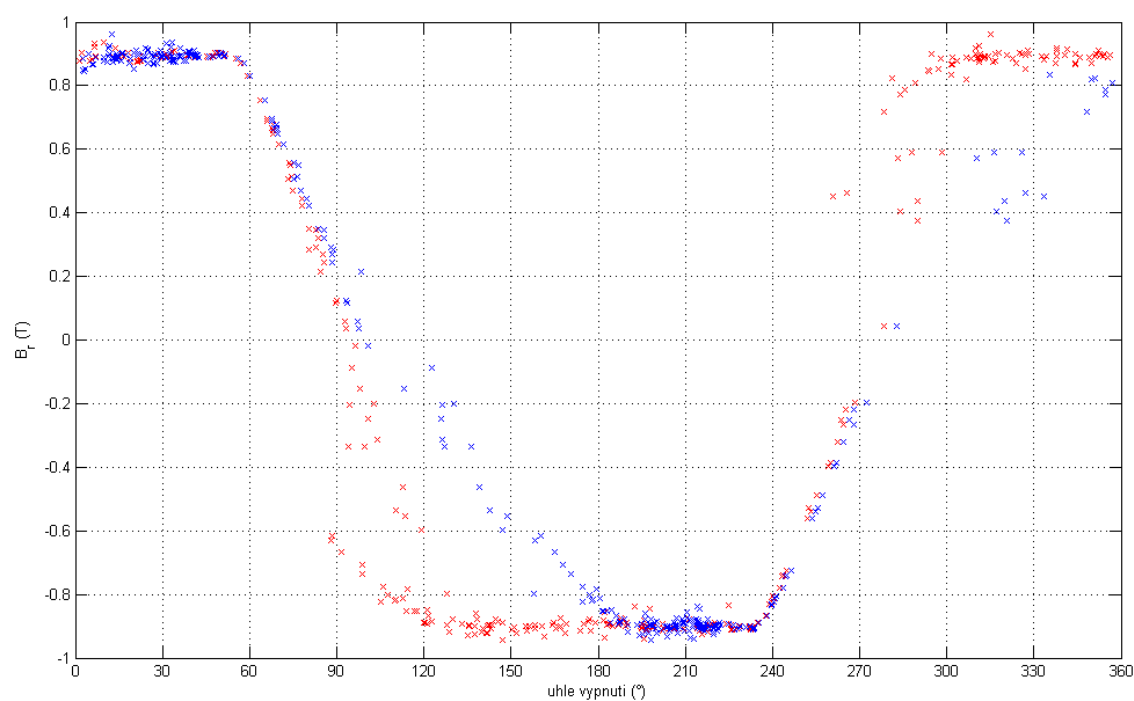
Při pohledu na charakteristiku remanentního toku u tohoto zapojení (Obr. 22) vidíme, že se tento odlišuje od průběhu, kdy byl obvod vypínán programovatelným zdrojem. Zde je vidět, že hoření oblouku se podepsalo na výsledném grafu v intervalech od $90^\circ - 210^\circ$ a $270^\circ - 30^\circ$. Výrazně se zvětšil posun, kdy stykač obvod odpojil od okamžiku, kdy byl uhašen oblouk. Oblouk spontánně zaniká při poklesu proudu k nule, tj. nejvíce bodů je nahuštěno v oblasti $180^\circ - 220^\circ$ a $10^\circ - 40^\circ$ (Obr. 22).



Obr. 20 - Naměřené průběhy – vypnutí stykačem naprázdno



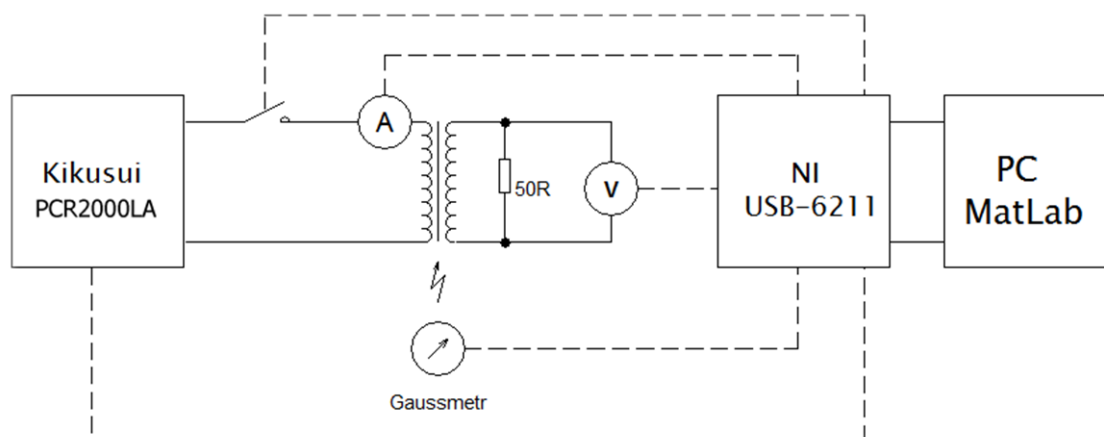
Obr. 21 - Hysterezní smyčka – vypnutí stykačem naprázdno



Obr. 22 - Vypínací mapa pro vypnutí pomocí stykače naprázdno

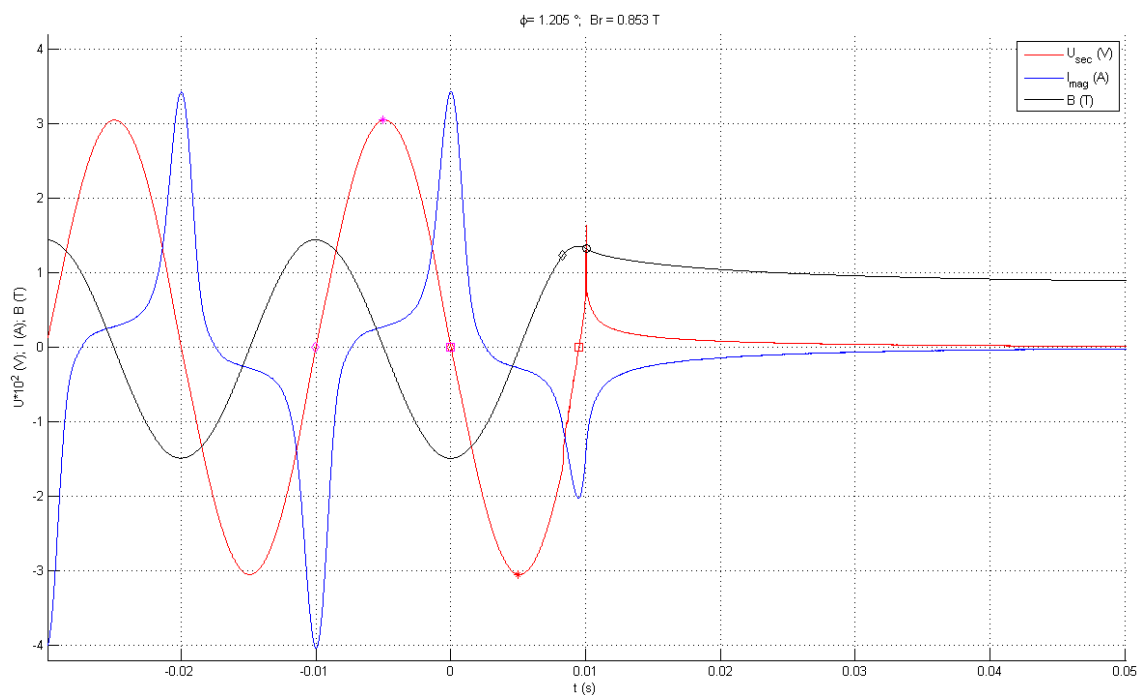
3.2.3. Vypnutí pomocí stykače - R zátěž ($R=50\Omega$)

Umístěním odporu na sekundární stranu vinutí (Obr. 23) jsme zatížili obvod a samotný transformátor, který se nyní bude přes tento odpor „vybíjet“, což bude mít vliv na měřené průběhy.



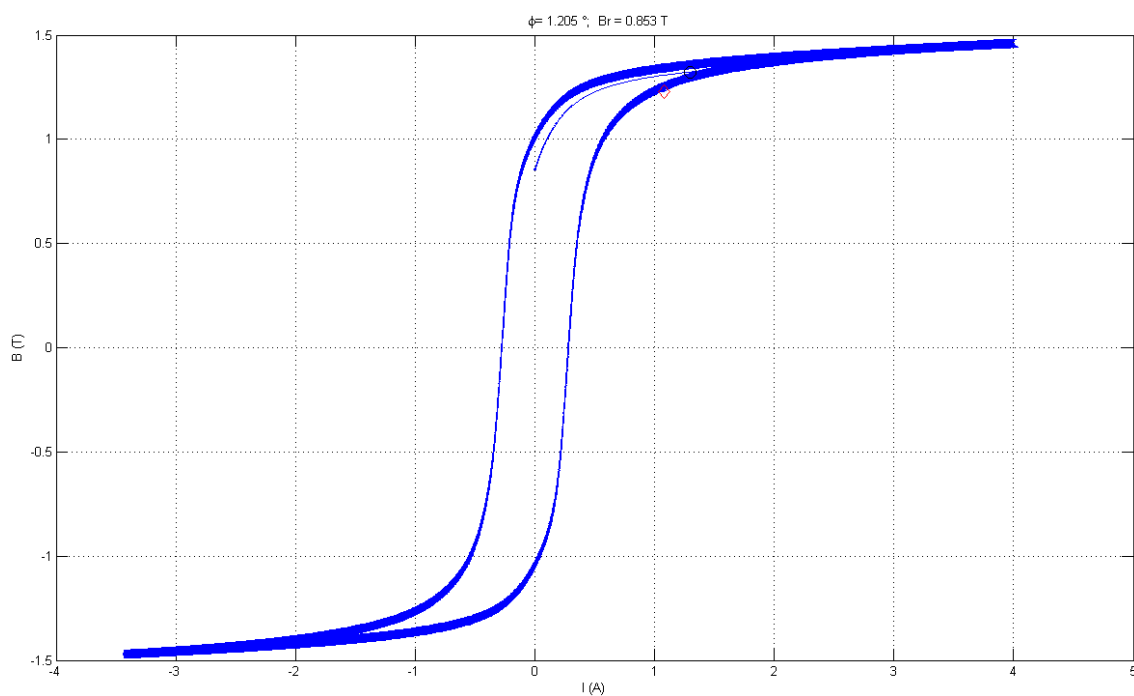
Obr. 23 - Zapojení pro zapojení naprázdno s rozepnutím stykačem a odporovou zátěží

Vlivem zátěže, na sekundární straně, klesl z důvodu zvýšení úbytku napětí, na obvodu primárního vinutí, magnetizační proud, což mělo za následek snížení magnetické indukce transformátoru z 1,55T na 1,45T (Obr. 24).



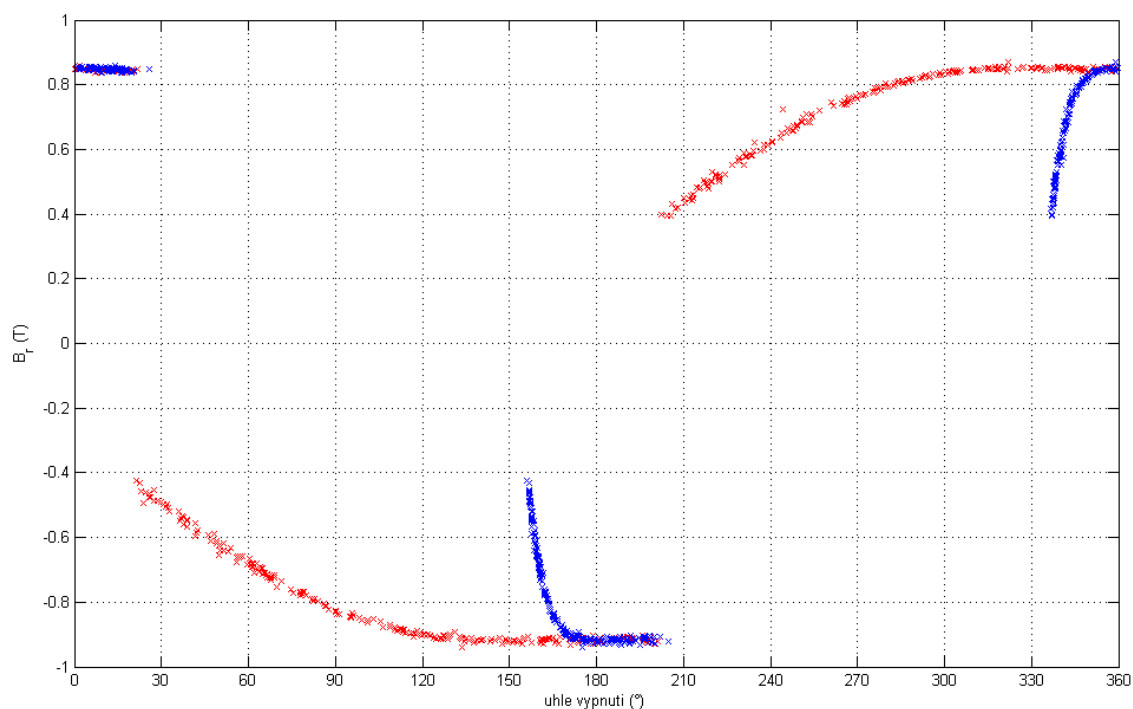
Obr. 24 - Naměřené průběhy – vypnutí stykačem + R zátěž

Tato změna měla také za následek velice nepatrné rozšíření hysterezní smyčky a její kolísání v oblastech blízkých nasycení.



Obr. 25 - Hysterezní smyčka – vypnutí stykačem + R zátěž

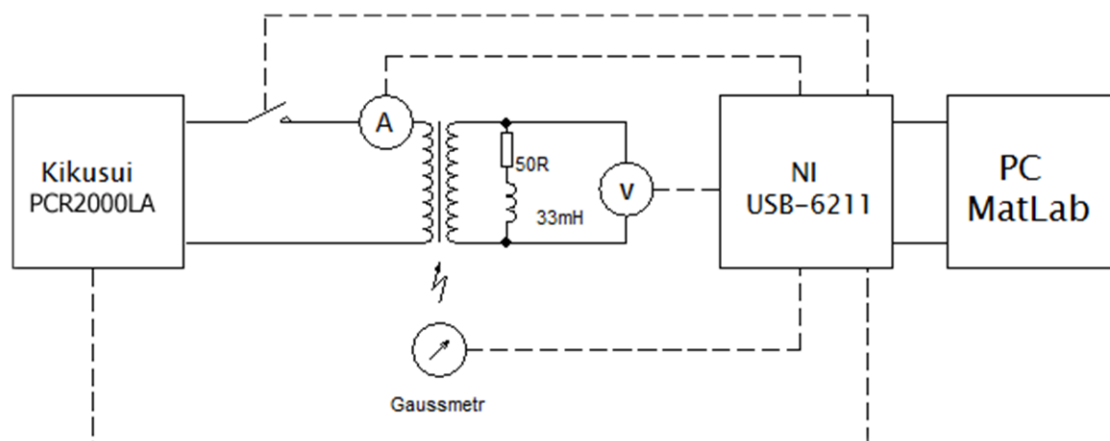
I obraz vypínacích proudů se od zapojení bez zátěže velice liší, což ukazuje, že zátěž má vliv na chování transformátoru při vypínání. Tyto výchyly jsou dané tím, že oblouk hořící mezi kontakty stykače zhasne až při průchodu 0. Nejlepší odezvu na vypnutí a minimální setrvačnost jeví obvod při rozepnutí v úhlech $350^\circ - 20^\circ$ a $170^\circ - 200^\circ$.



Obr. 26 - Vypínací mapa pro vypnutí pomocí stykače s přidanou R zátěží

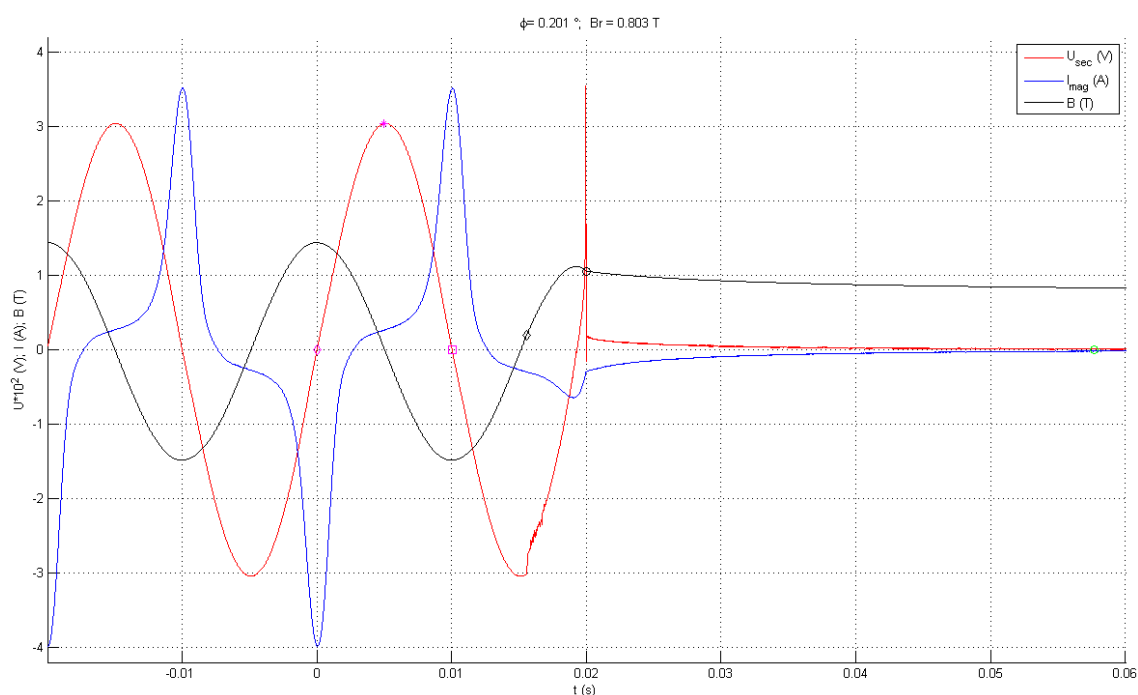
3.2.4. Vypnutí pomocí stykače - RL zátěží ($R=45\Omega$, $L=33\text{mH}$)

K předchozímu zapojení jsme doplnili indukčnost (Obr. 27), která nám na sekundární straně vinutí vytvořila RL obvod. Do cívky se naakumuluje energie, což bude mít za následky fázový posuv zatěžovacího proudu a změnu chování měřeného obvodu.



Obr. 27 - Zapojení pro zapojení naprázdno s rozepnutím stykačem a RL zátěží

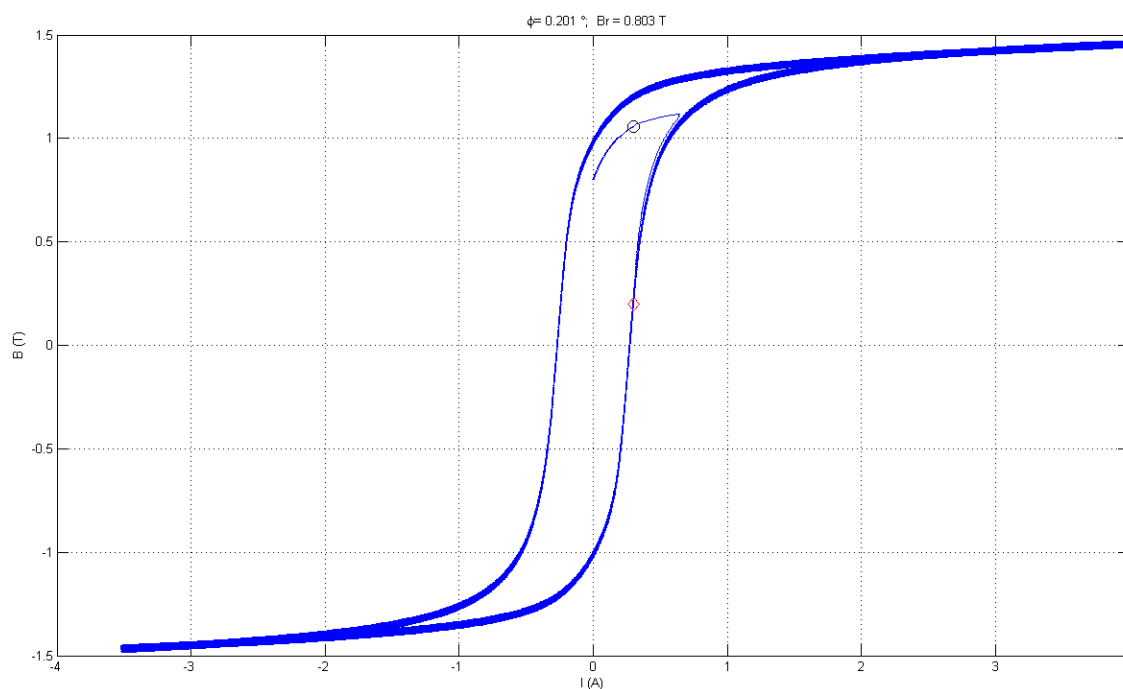
Vlastnosti frekvenčně závislého RL členu se projeví v okamžiku rozepnutí obvodu, kdy dojde k hoření oblouku. Fázový posun proudu zátěže způsobuje další posun okamžiku uhašení výboje (Obr. 28).



Obr. 28 - Naměřené průběhy – vypnutí stykačem + RL zátěž

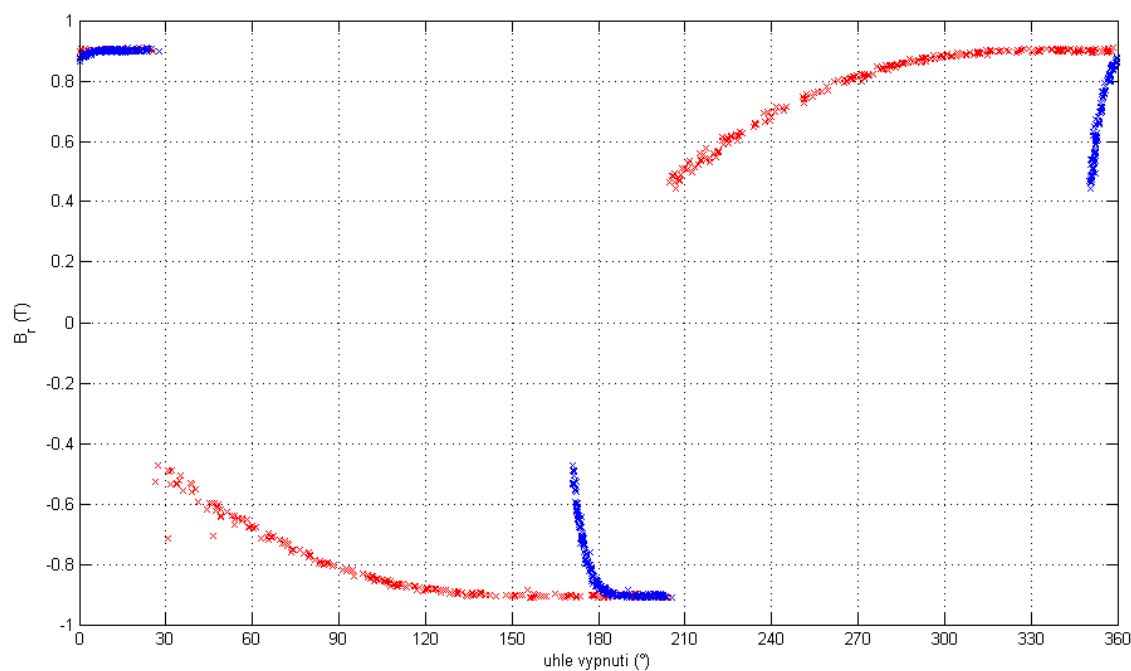
Hysterezní smyčka (Obr. 29) odpovídá smyčce s čistě reálnou zátěží (3.2.3). Výběžek uvnitř hysterezní smyčky opět demonstruje vypnutí transformátoru. Kosočtverec ukazuje hodnotu rozpojení kontaktů stykače a značka kroužku okamžik uhašení oblou-

ku mezi kontakty. Dále magnetický tok klesá ve shodě s relaxačním napětím. V tomto úseku je energie z transformátoru měřena v zátěži.



Obr. 29 - Hysterezní smyčka – vypnutí stykačem + RL zátěž

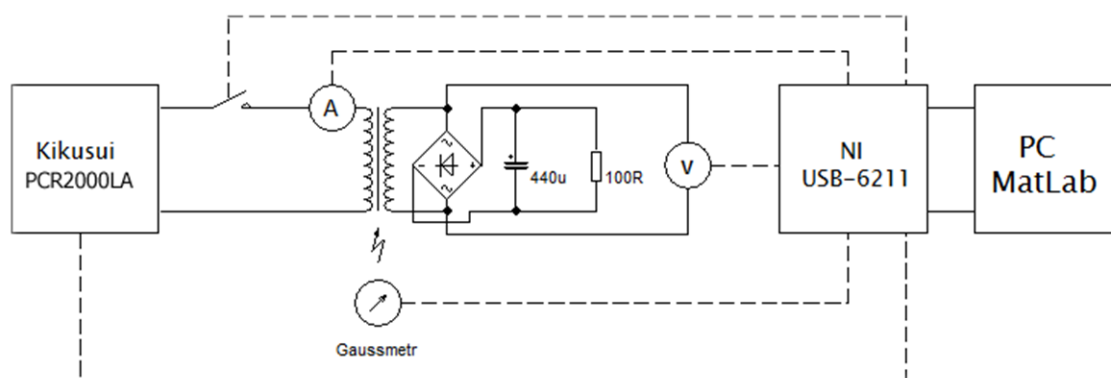
Na charakteristice remanentní indukce (Obr. 30) si lze povšimnout, oproti čistě odporové zátěži, posunutí fáze pro vypnutí uhašení oblouku (modré křížky) vlivem fázového posunu proudu díky přidané indukčnosti. Indukčnost jako taková nám také pomáhá udržet hořící oblouk tím, že se ho snaží dotovat vlastní energií (v podstatě se chová jako svářečka), což způsobuje ještě větší prodlevy mezi zapojením pouze s odporovou zátěží (3.2.3).



Obr. 30 - Vypínací mapa pro vypnutí pomocí stykače s přidanou RL zátěží

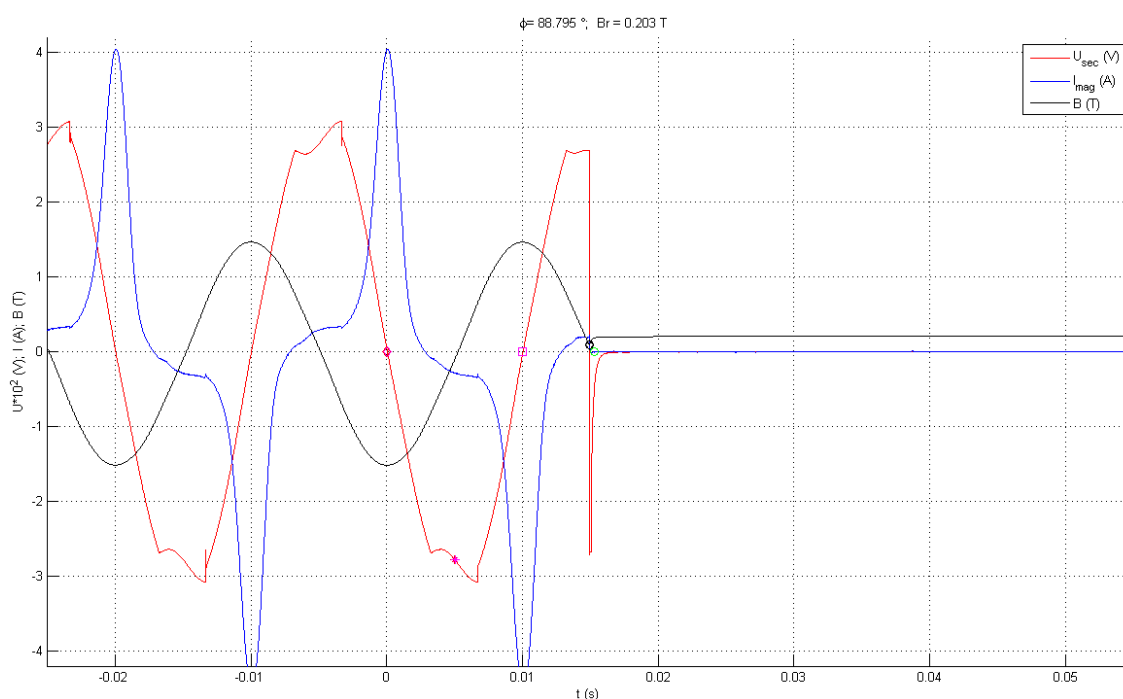
3.2.5. Vypnutí pomocí stykače - s usměrňovačem ($R=100\Omega$, $F=440\mu F$)

Jako poslední zapojení jsme proměřili případ použití transformátoru v obvodu – jako zdroj DC proudu. K transformátoru jsme tudíž připojili usměrňovací diodový můstek, filtrační kondenzátor a zatěžovací odpor (Obr. 31).



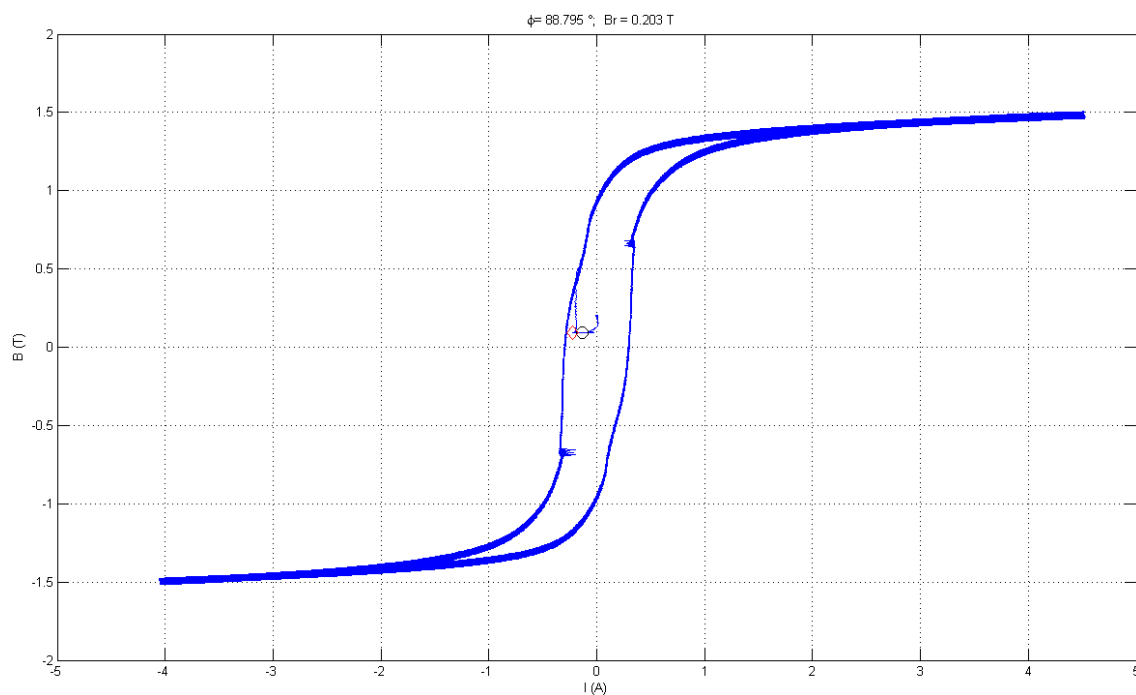
Obr. 31 - Zapojení pro zapojení s usměrňovačem a rozepnutím stykačem

Charakteristika průběhů tohoto zapojení (Obr. 32) se od všech předchozích variací již na první pohled znatelně liší. Průběhy magnetizačního proudu a sekundárního napětí jsou zkreslené z důvodu použití diodového usměrňovače na sekundární straně vinutí a charakteristického chování použitých polovodičových diod. Diody řídí průběh proudu do zátěže tak, že není spojitý, ale pulzní. V okamžiku sepnutí diod dojde vlivem velkého proudového pulzu k úbytku napětí na primárním vinutí a k propadu indukovaného a sekundárního napětí - oříznuté vršky period. Pracovní (sekundární) proud není na obrázku zobrazen; je tam pouze proud magnetizační, na kterém se tyto pulzy neprojevují.



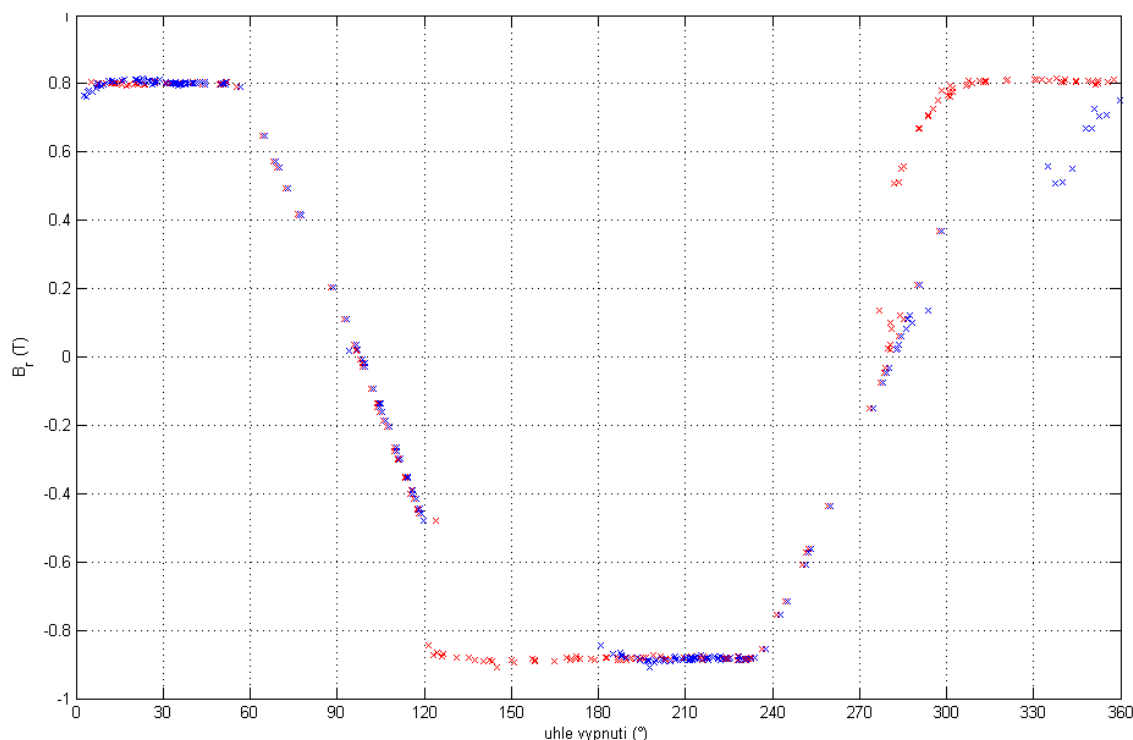
Obr. 32 - Naměřené průběhy – vypnutí stykačem + usměrňovač

Hysterezní křivka (Obr. 33) má v tomto zapojení rozšířenou oblast ve své strmé části s viditelnými zákrutami způsobenými vypínáním diod v usměrňovači. Toto je způsobeno zvýšením ztrát v transformátoru při průchodu pulzního proudu. Úbytek v primárním vinutí je při pulzech zvětšen o nárůst odporu vlivem povrchového jevu. Použitý algoritmus výpočtu indukce toto nezohledňuje, a proto dochází k rozšíření smyček.



Obr. 33 - Hysterezní smyčka – vypnutí stykačem + usměrňovač

Z charakteristiky remanentní indukce vidíme, že se hodně podobá zapojením naprázdno (3.2.1 a 3.2.2). To je dáno tím, že diody oddělují zátěž a ve velké části periody je transformátor v podstatě v režimu naprázdno. V okolí fázových úhlů 90° a 270° , kdy jsou diody sepnuté, dochází k podobnému posunu okamžiku uhašení oblouku jako u odporové zátěže.



Obr. 34 - Vypínací mapa pro vypnutí pomocí stykače s můstkovým usměrňovačem

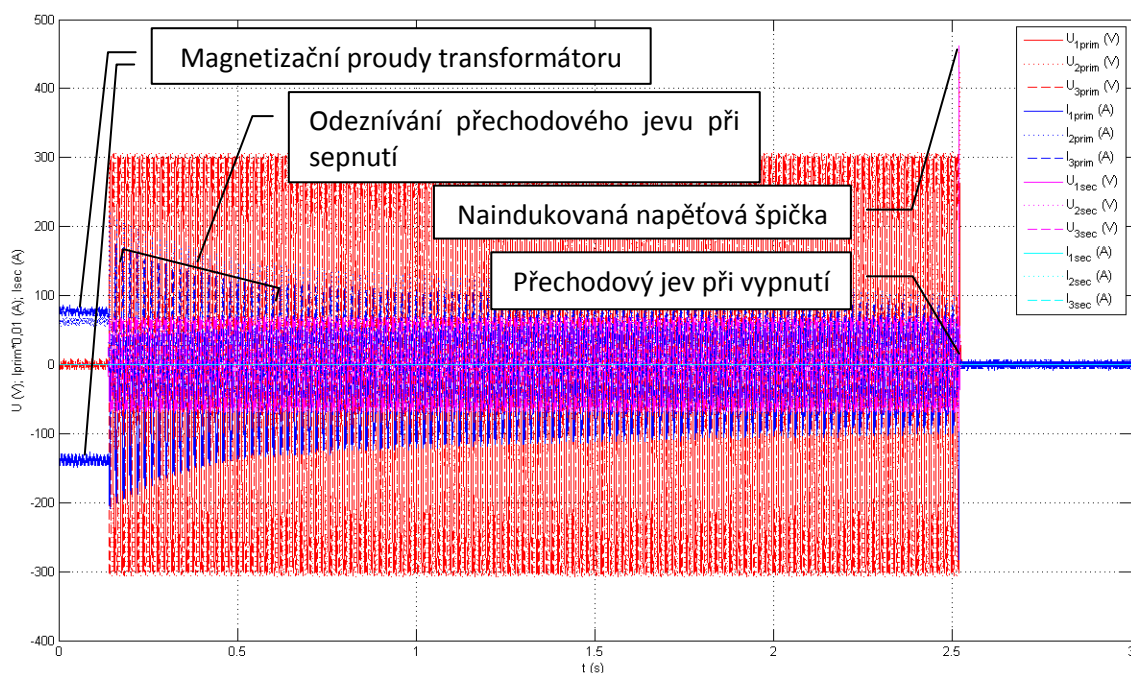
3.3. Měření třífázového transformátoru

Při měření tohoto zadání jsme vycházeli z poznatků zjištěných při výše uvedeném zapojení s jednofázovým transformátorem (3.2). Díky těmto poznatkům jsme mohli redukovat modifikace zátěží na pouhé dvě – naprázdno a s odporovou zátěží, jelikož zapojení s RL se velice podobá zapojení s R zátěží a zapojení s usměrňovačem se naopak velmi blíží zapojení naprázdno. Takto jsme ušetřili prostředky i čas. Avšak tyto druhy zátěží jsme museli aplikovat pro různá skupinová zapojení vinutí transformátoru. Pro názorný ukázkový průběh byla dvě kompletní měření praktikována s programovatelným AC zdrojem Chroma, který zaručoval čisté sinusové průběhy jejich stálost na vstupu transformátoru a tím pádem i na výstupu, jelikož transformátor tyto průběhy modifikoval jen velmi lehce. Poté jsme transformátor připnuli ke klasické elektrické rozvodné síti a měřili chování transformátoru v reálném zapojení, kdy se uplatní veškeré neduhy sítě. V tomto zapojení jsme proměřili všechna používaná skupinová zapojení. V tomto měření s elektrorozvodnou sítí jsem vycházel z chování transformá-

toru, které jsem již zkoumal v ročníkovém projektu. Z tohoto projektu jsem také přebral měřicí stanici a zapojení.

Jak již bylo uvedeno výše, celé měření bylo realizováno tak, aby při sepnutí transformátoru byl minimalizován přechodový jev a proudové špičky a aby byl průběh brzy stabilní a nemuseli bychom zdlouhavě čekat na jeho ustálení. Pro tuto funkci jsme použili část programu z ročníkového projektu, která nám toto zaručila. Tím pádem jsme měli vhodné podmínky pro samotné měření vypínání transformátoru.

K měření na třífázovém transformátoru nám posloužil stejný program, jakým jsme měřili jednofázové zapojení, ale museli jsme jej modifikovat pro třífázové průběhy. Mimo jiné jsme u tohoto zapojení zapojili zátěž přes stykač, který nám umožňoval zátěž softwarově připínat a odepínat a tak zjednodušit a zrychlit celé měření.



Obr. 35 - Naměřené průběhy na 3f transformátoru i s jevy při zapnutí (připnutí k síti)

Samotné měření probíhalo tak, že došlo k sepnutí stykače (zdroje), počkalo se, až se ustálí přechodové jevy při sepnutí a poté se obvod vypnul a měřil se průběh při vypnutí, který se posléze vyhodnocoval. V případě napájení z elektrorozvodné sítě (Obr. 35) došlo nejprve k předmagnetizaci obvodu, aby se tento uvedl do správné. Poté se sepnul tyristorový modul a transformátor se připojil k síti, kdy došlo k minimálnímu nadproudu při přechodovém jevu. Počáteční proudový výkyv během několika period

odeznívá. Po cca 2 sekundách došlo k odpojení transformátoru od sítě stykačem. Během celého průběhu byly zaznamenávány průběhy napětí a proudů na transformátoru.

Vyhodnocování průběhů bude probíhat pro každou fázi zvlášť, jelikož je to přehlednější a vypovídající a také z důvodu, že se jednotlivé fáze vzájemně ovlivňují. To znamená, že když v praxi nedojde k vypnutí všech fází naráz v jeden moment, budou fáze odpojené později dotovat odpojenou fázi a vznikne tím špičkové indukované napětí, které odezní po exponenciále. Také budou od sebe vzájemně posunuté o 120° (jednotlivý posuv mezi fázemi v 3f vedení).

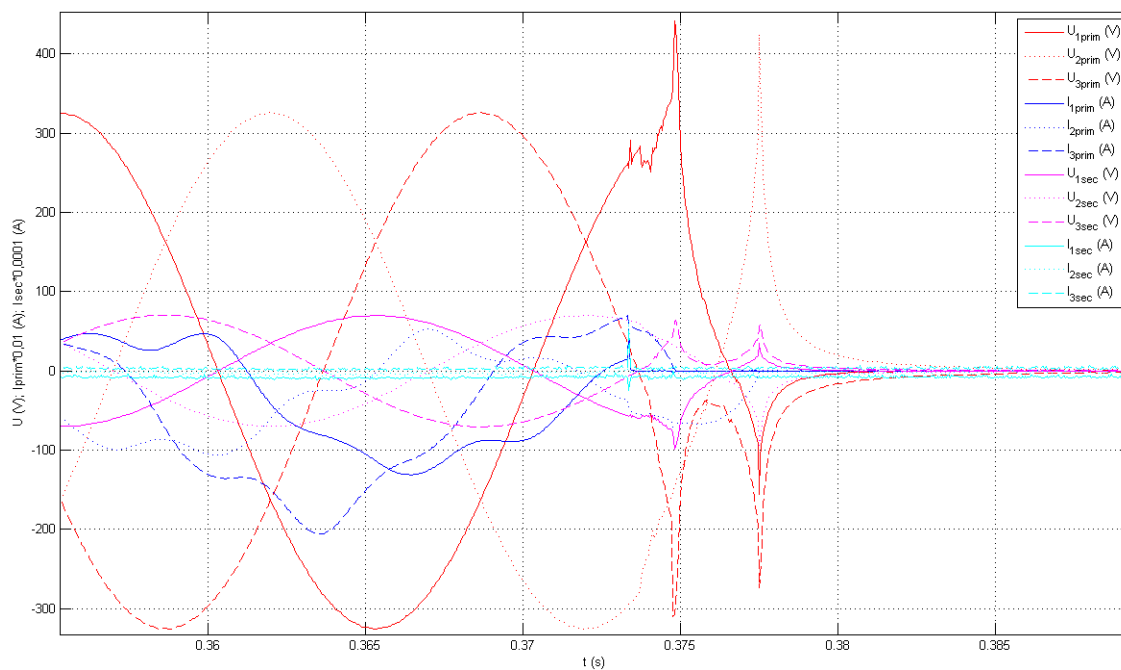
V případě zapojení do sítě je nutné počítat s tím, že se rozvodná síť nechová ideálně, ale jsou v ní poklesy napětí a výkyvy, průběhy mohou být různě zdeformované rušením naindukovaným do vedení a proto mohou i měřené výsledky kolísat v tomto duchu.

3.3.1. Napájení program. zdrojem Chroma – zapojení YNy

Podle zadání byla provedena i měření při napájení z programovatelného výkonového zdroje, v našem případě Chroma 61705, který simuluje na pájecí síť. Průběhy v ustáleném provozním stavu jsou při použití zdroje, který generuje čistě sinusový průběh, ideální.

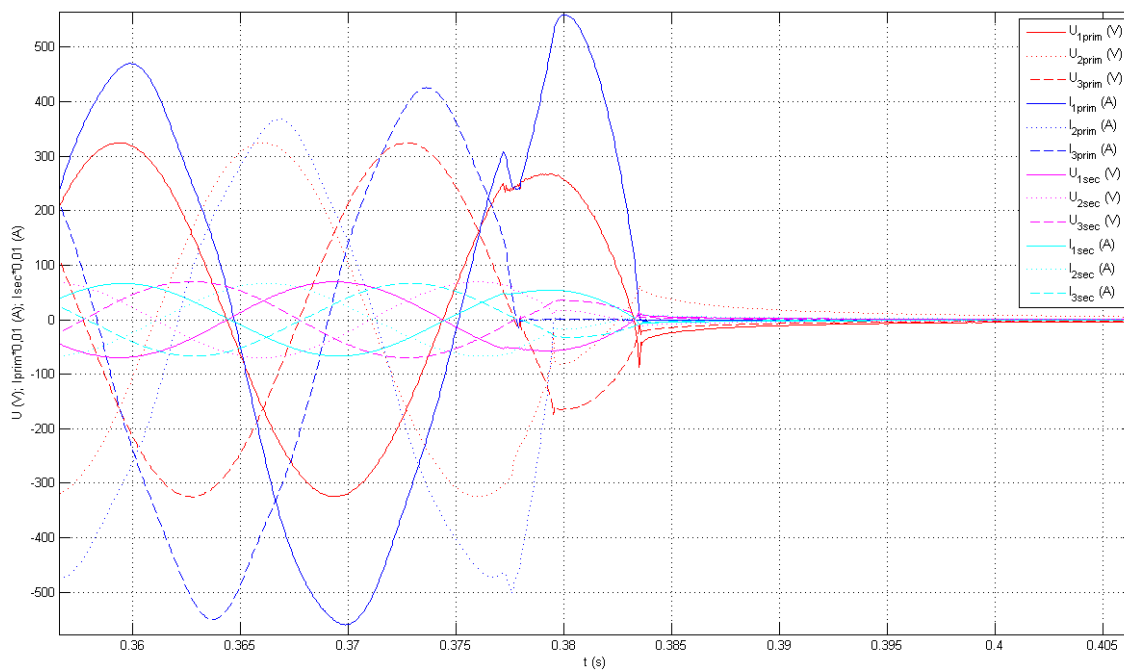
Při vypnutí se ale zdroj nechoval podle předpokladu. Chování bylo rozdílné od jednofázového zdroje Kikusui, použitého při předchozích měřeních. Bylo očekáváno, že zdroj bude kontrolovat výstupní napětí a udržovat jej na nulové hodnotě, ale to se nedělo. Následující obrázky zachycují provedená měření, ale průběhy nebyly dále zpracovávány, protože neodpovídají reálnému provozu transformátoru.

3.3.1.1. Vypnutí naprázdno



Obr. 36 - Naměřené průběhy YNy – vypnutí zdrojem naprázdno

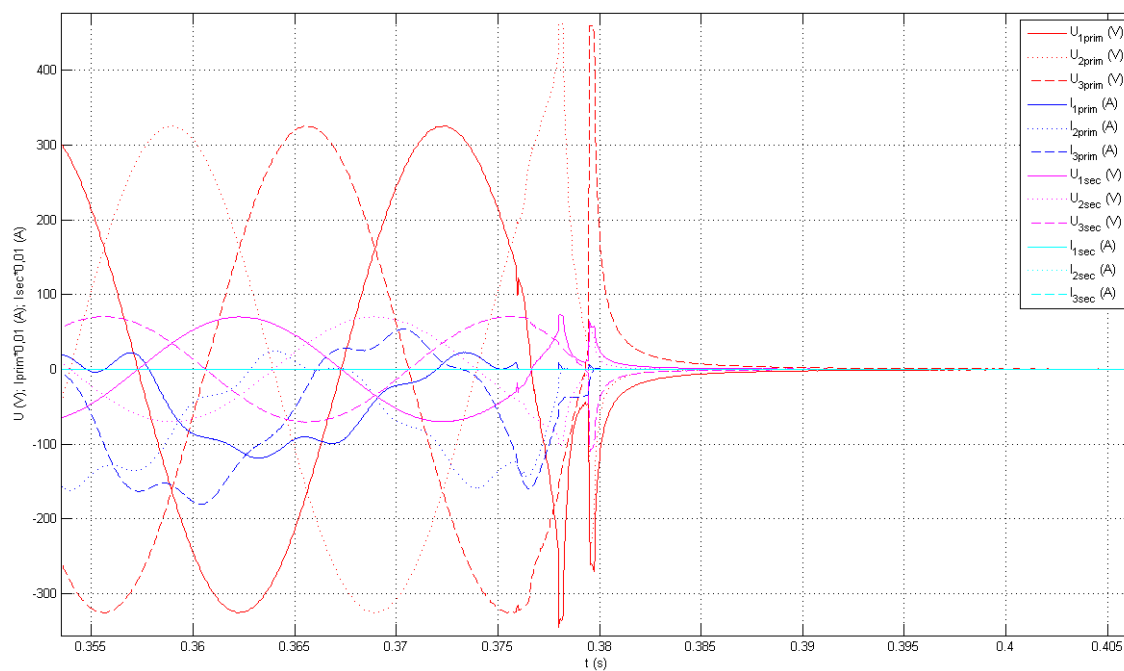
3.3.1.2. Vypnutí se zátěží



Obr. 37 - Naměřené průběhy YNy – vypnutí zdrojem se zátěží

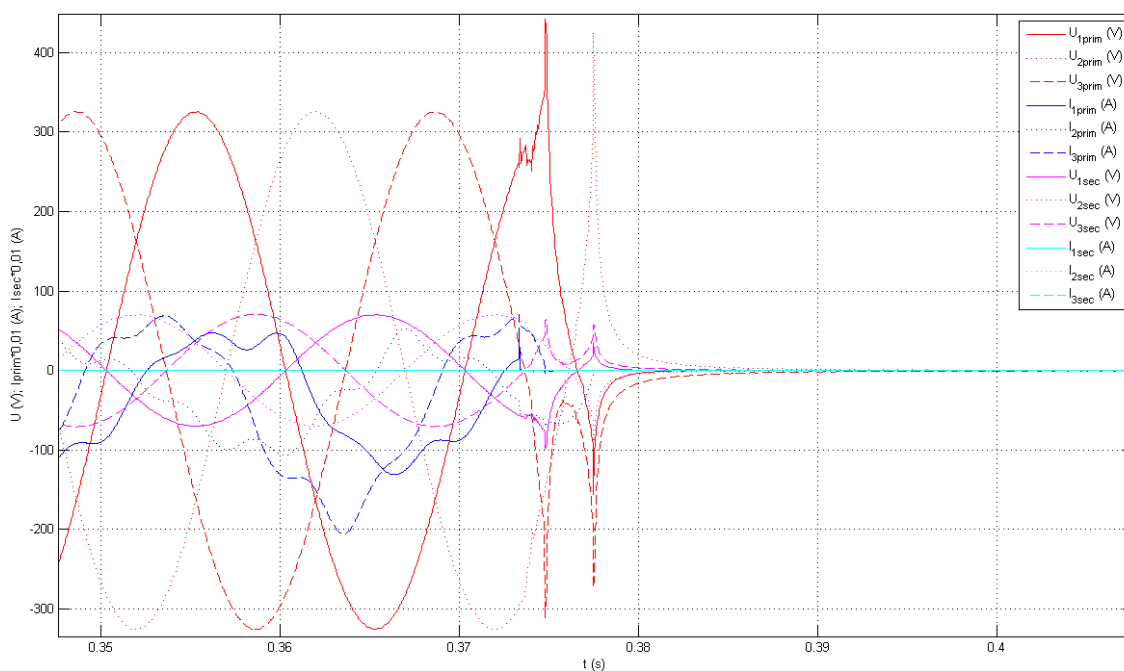
3.3.2. Napájení program. zdrojem Chroma – zapojení YNyn

3.3.2.1. Vypnutí naprázdno



Obr. 38 - Naměřené průběhy YNyn – vypnutí zdrojem naprázdno

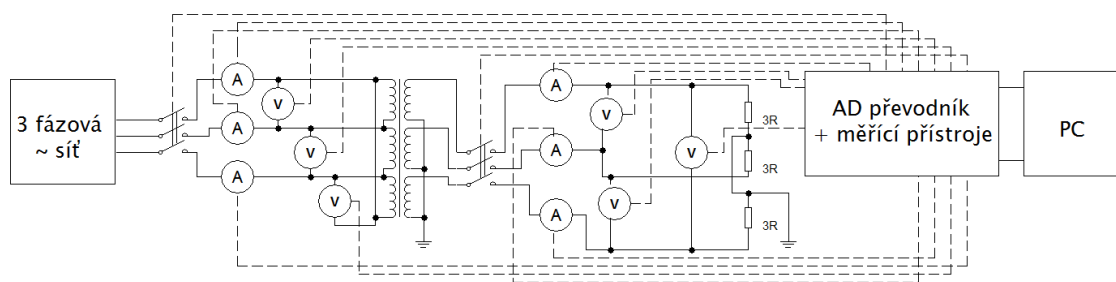
3.3.2.2. Vypnutí se zátěží



Obr. 39 - Naměřené průběhy YNyn – vypnutí zdrojem se zátěží

3.3.3. Napájení z elektrické sítě – zapojení Dyn

V tomto zapojení vycházíme ze zapojení na Obr. 40. Primární vinutí se v tomto zapojení nachází v zapojení do trojúhelníka a sekundární do hvězdy s vyvedeným středem. V tomto případě by mělo zapojení do trojúhelníka na primární straně omezovat magnetizační proudy tekoucí do transformátoru.

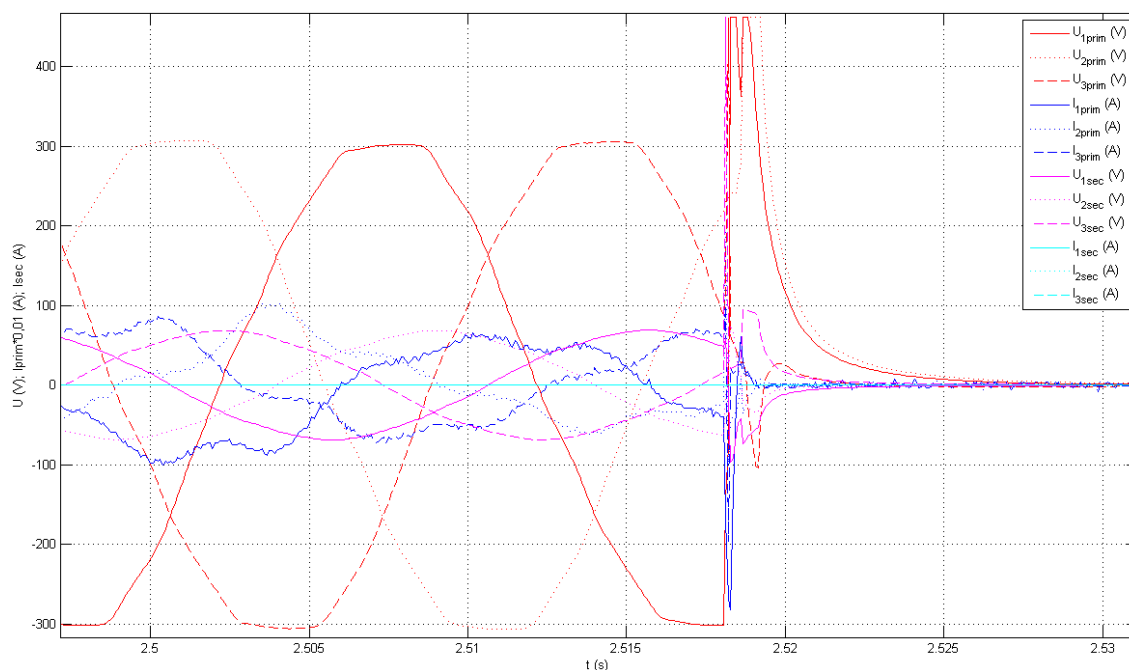


Obr. 40 - Schéma zapojení Dyn

3.3.3.1. Vypnutí naprázdno

Naprázdko jsme měřili tak, že jsme v programu pro měření odpojili stykačem zátěž. Bez zátěže sekundárním vinutím protékal ideálně nulový proud.

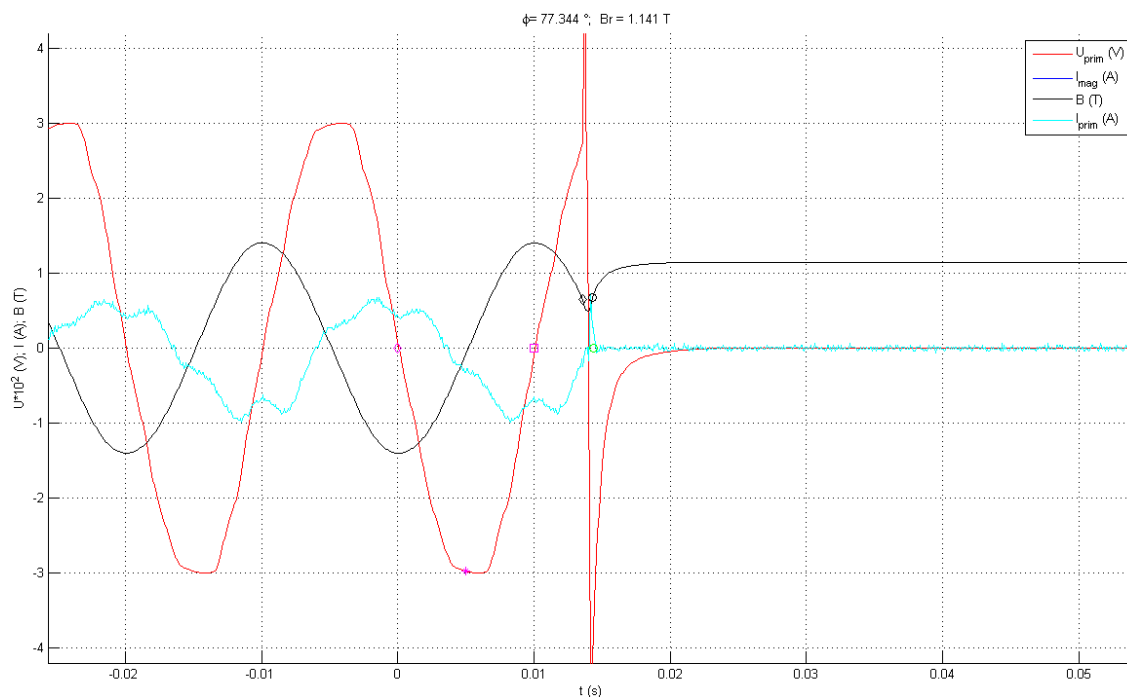
Také si lze všimnout tvaru křivky primárního napětí v době rozeznutí obvodu (např. Obr. 41), na které se nachází dvě špičky. Ta první z nich je dána tím, že zbylé fáze se snaží dotovat tuto fázi, která byla vypínána dříve než ostatní. Druhá špička je samotné naindukované napětí při finálním vypnutí transformátoru. Toto se však děje i u ostatních skupinových zapojení vinutí a nejen u tohoto – způsobuje to společný magnetický obvod, přes který se vinutí vzájemně ovlivňují.



Obr. 41 - Naměřené průběhy Dyn – vypnutí stykačem naprázdno

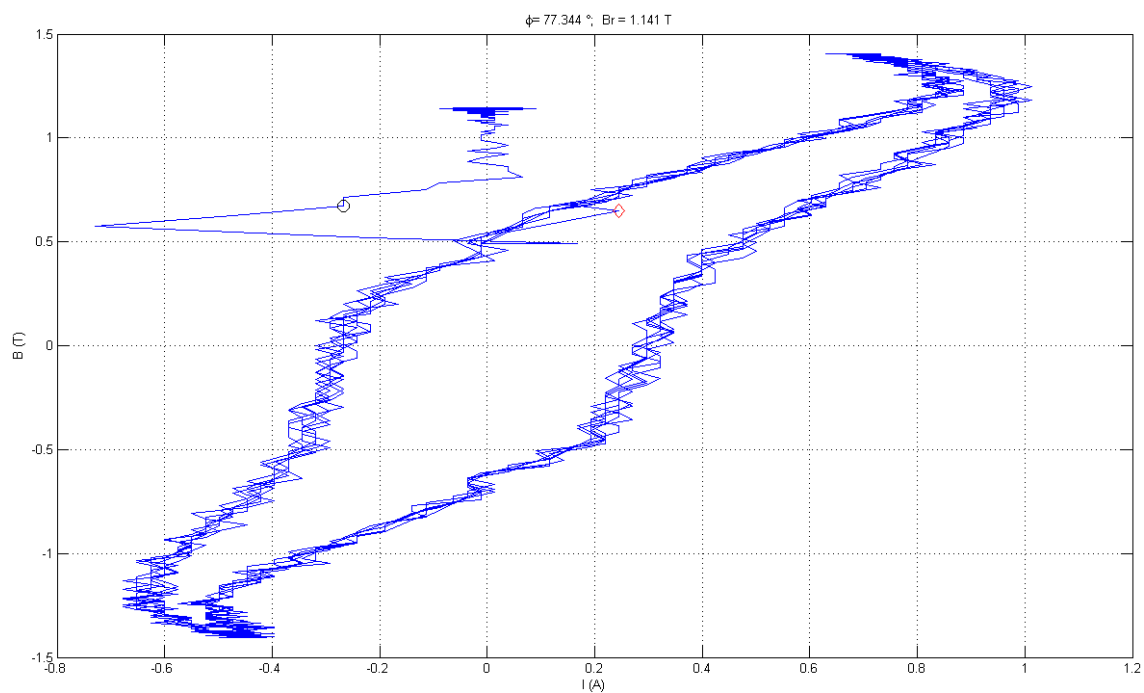
Průběh proudu primárním vinutím v ustáleném stavu je díky zapojení do trojúhelníka méně zkreslený čistý a vykazuje klasický průběh pro 3f transformátor (Obr. 42).

Tento průběh byl vybrán jako názorný, protože zde vidíme charakteristickou vlastnost 3f transformátorů na společném magnetickém jádru. V okamžiku vypnutí transformátoru dochází k dotování magnetické indukce v magnetickém obvodu příslušející této fázi a místo toho, aby při vypnutí magnetická indukce klesala, naopak vzroste a až z této nové úrovně mírně poklesne a ustálí se na hodnotě remanentního toku, viz černý průběh na Obr. 42.



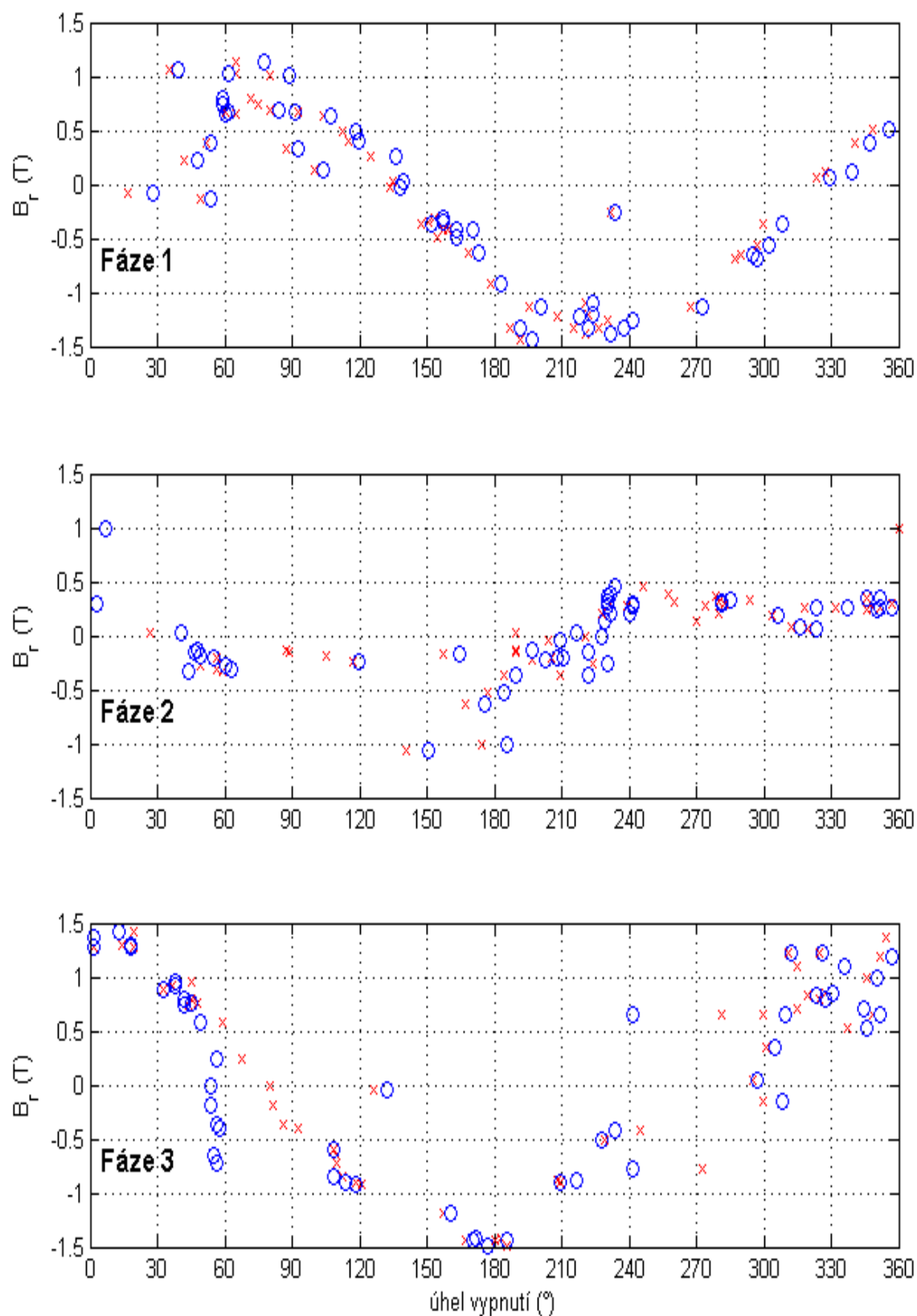
Obr. 42 - Příklad jedné fáze (Dyn_0) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS

Fakt, že magnetický obvod byl dotován ostatními fázemi, způsobuje tu věc, že při vypnutí transformátoru se remanentní indukce v tomto jádře nikoli vrací dovnitř magnetizační smyčky, ale v některých případech dochází k tomu, že indukce právě naopak z této smyčky uteče vně (Obr. 43). Také zvednuté konce smyčky, které byly u jednofázového transformátoru rovnoběžné s osou x , mají za vinu ostatní dvě fáze v transformátoru.



Obr. 43 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (Dyn_0) (z průběhu výše)

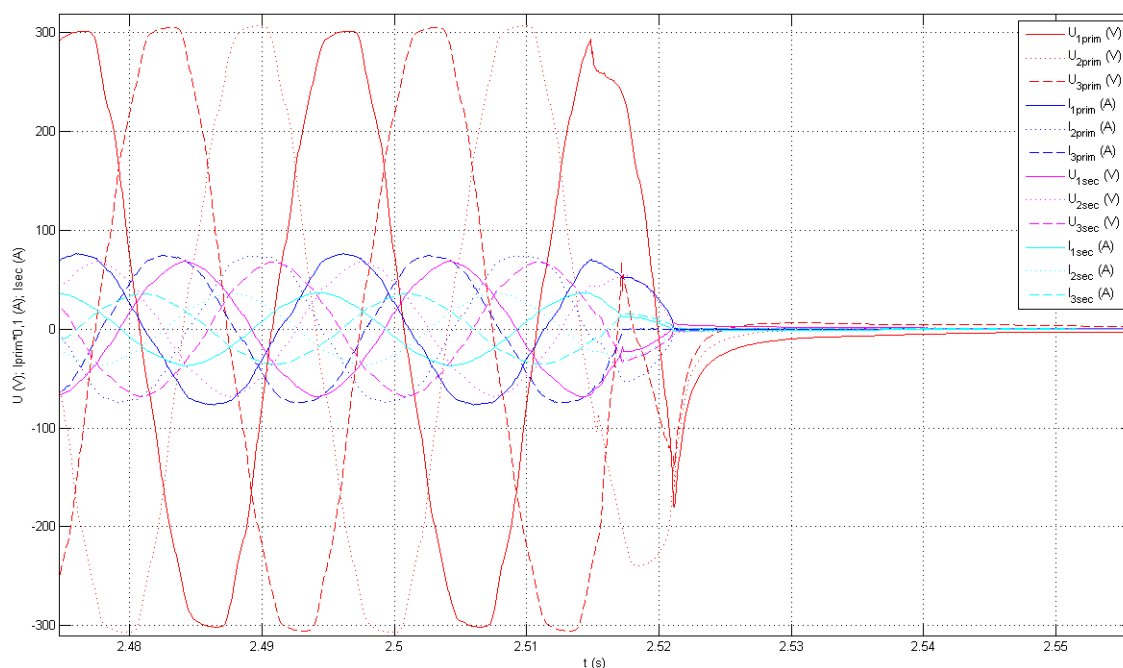
Vypínací mapy (Obr. 44) jsem udělal pro každou fázi zvlášť z důvodu lepší čitelnosti a názornosti. Je však vidět, že mají podobný tvar, ale s jistým fázovým posuvem mezi jednotlivými fázemi. Prostřední fáze má úplně odlišný charakter remanentní indukce. To může být způsobeno nesymetrií magnetického obvodu právě na této fázi – střední sloupek transformátoru.



Obr. 44 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Dyn naprázdno

3.3.3.2. Vypnutí se zátěží

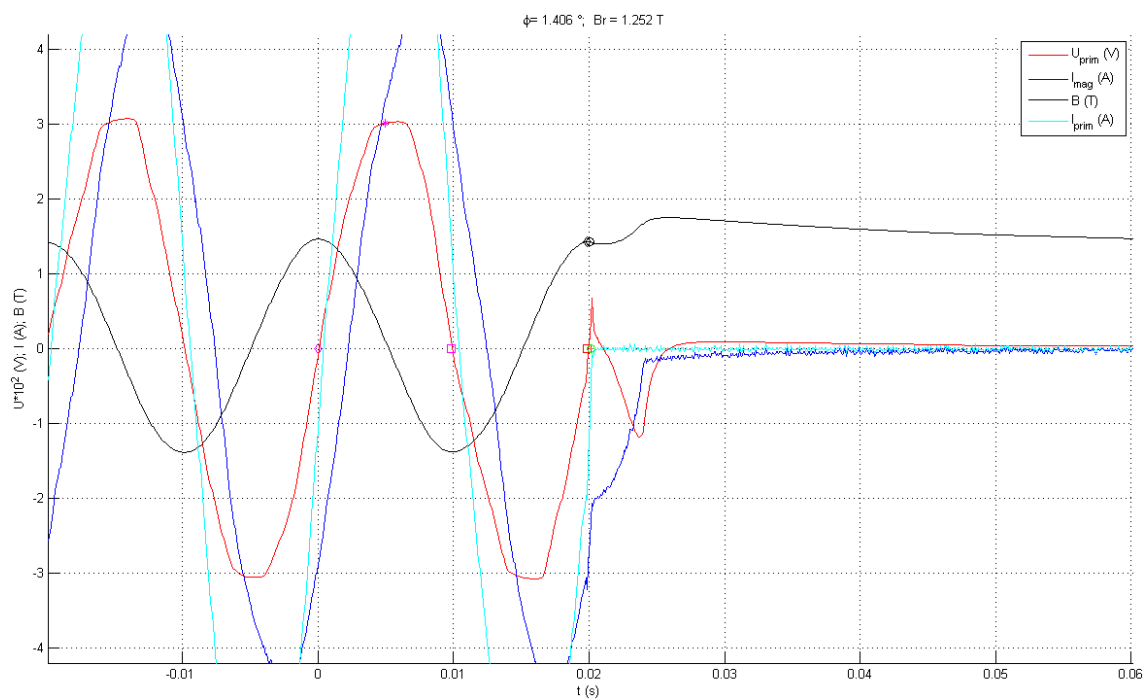
V tomto měření se již stykačem připnula zátěž v podobě 3 reostatů nastavených na hodnotu cca 3Ω z důvodu omezení jejich maximálním ztrátovým výkonem, což se projevilo na měřených průbězích (Obr. 45) tím, že již na sekundárním vinutí protéká proud, který má vliv na sekundární napětí.



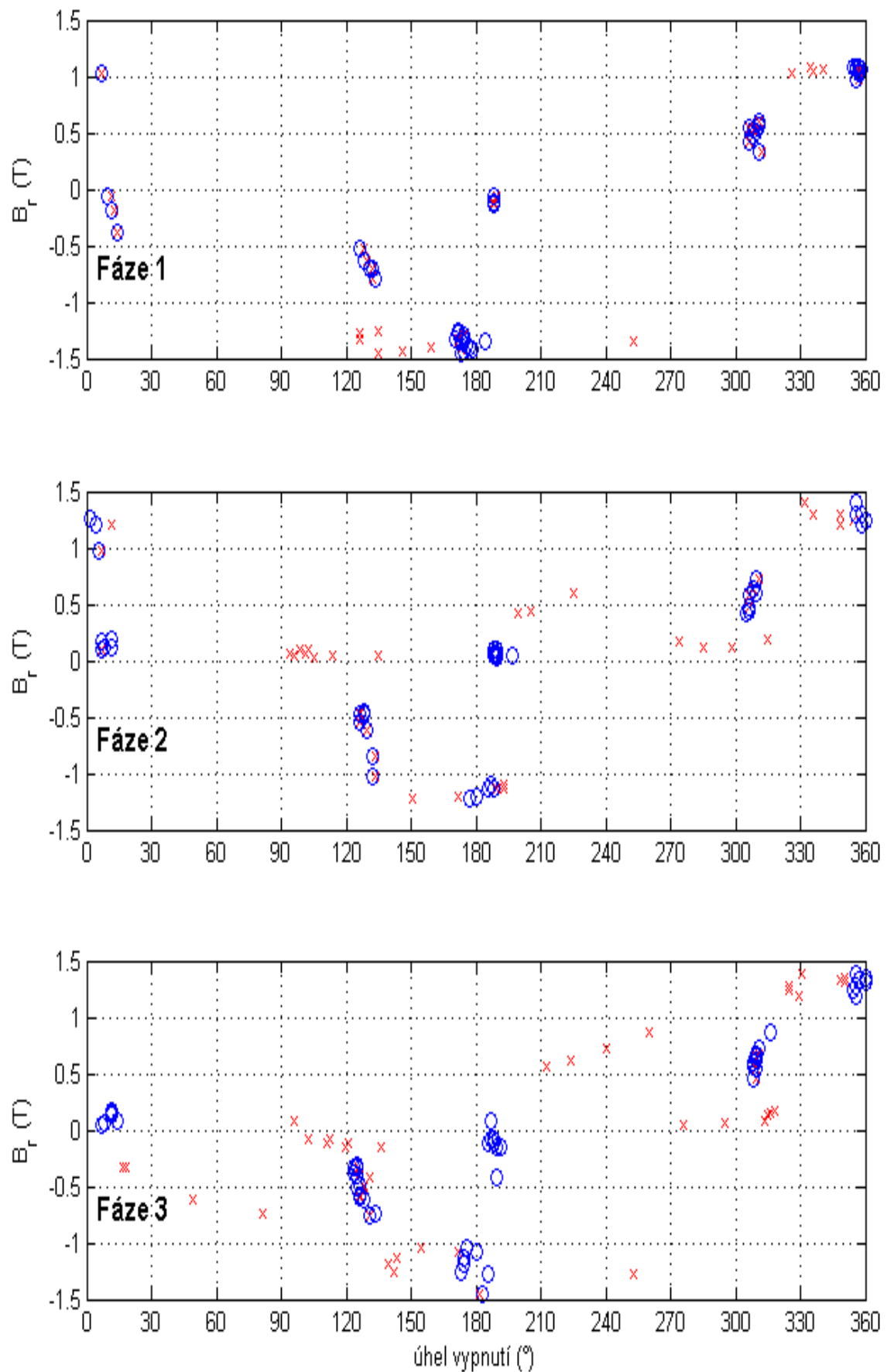
Obr. 45 - Naměřené průběhy Dyn – vypnutí stykačem se zátěží

Na průběhu při vypnutí jedné fáze vidíme opět dotaci ostatními vinutími, která se projevuje skokem remanentní indukce při vypnutí transformátoru (Obr. 46).

Obrázek vypínací charakteristiky (Obr. 47) ukazuje to, že se v tomto měření jednotlivá měření opakovala ve stejné fázi rozepnutí, proto jsou v některých místech shluky více bodů a pomyslná křivka působí stroze. Ale i přes tuto strohost lze poznat tvar pomyslné křivky. Toto by se nejspíše odstranilo více cykly opakovaného měření. Jednotlivé fáze jsou si velmi podobné. Z grafu je názorně vidět, že remanentní indukce dosahuje zcela až k hodnotě pracovní indukce tj. 1,5 T.



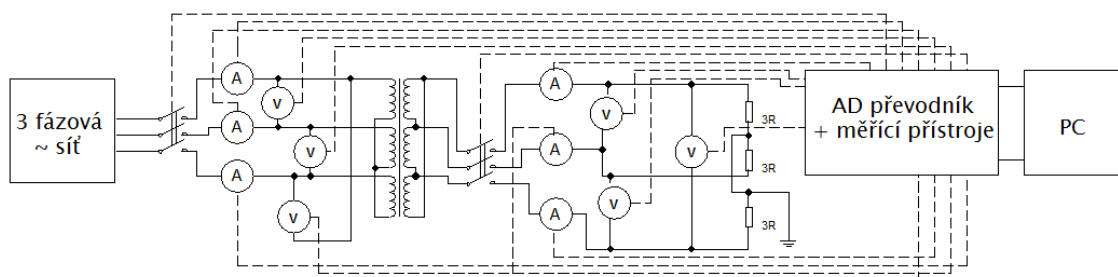
Obr. 46 - Příklad jedné fáze (Dyn_R) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS



Obr. 47 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Dyn se zátěží

3.3.4. Napájení z elektrické sítě – zapojení Yd

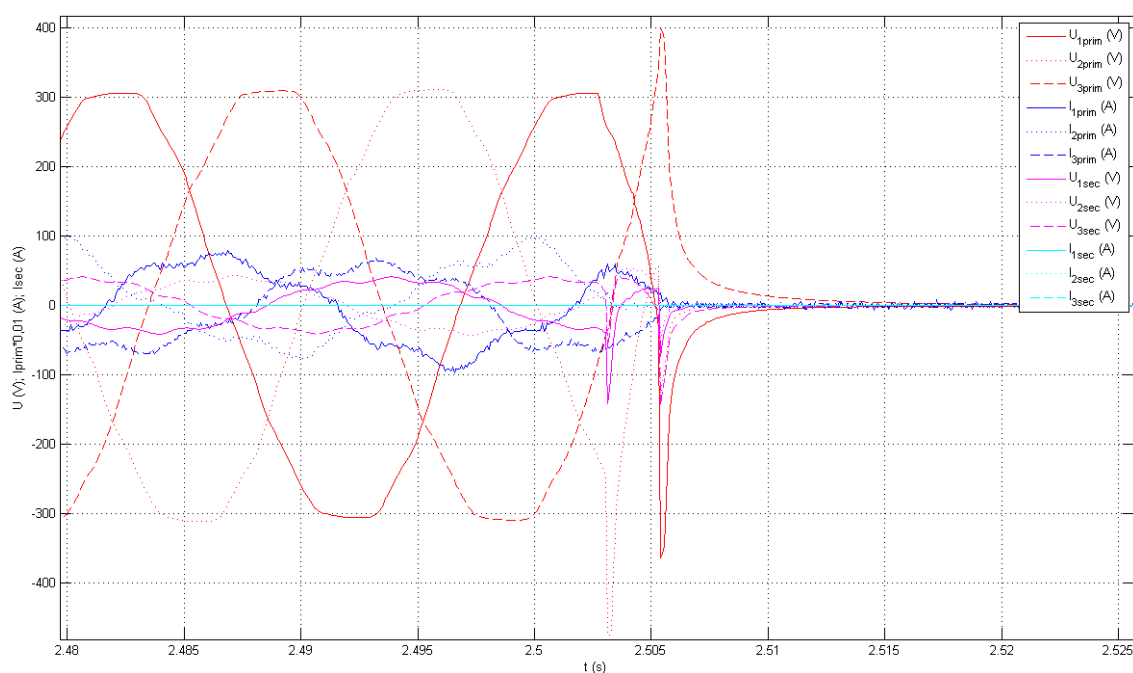
Při tomto měření jsem přepojil primární vinutí do trojúhelníka a sekundární do hvězdy. Ostatní zapojení zůstalo totožné.



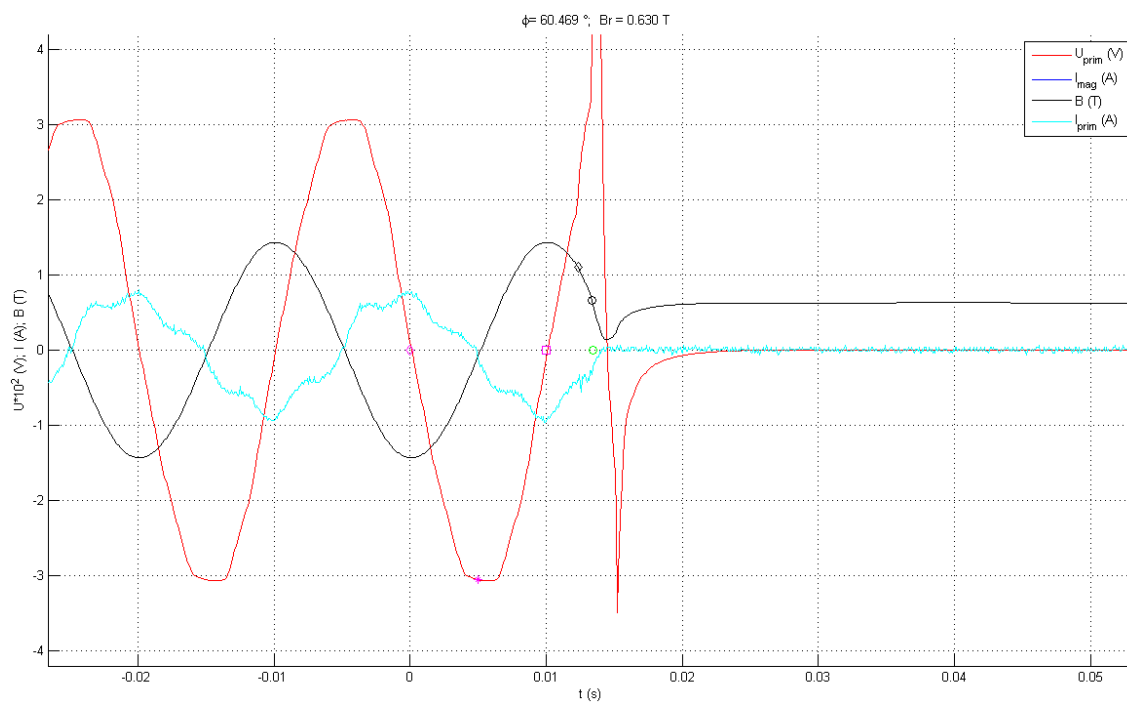
Obr. 48 - Schéma zapojení Yd

3.3.4.1. Vypnutí naprázdno

Primární proudy jsou u tohoto zapojení více zkreslené, než u předchozích měření, což je dáno tím, že jsme primární vinutí zapojili do trojúhelníka. Také jsou zde patrné špičky primárního napětí vzniklé při rozepnutí transformátoru vlivem vzájemné dotace.

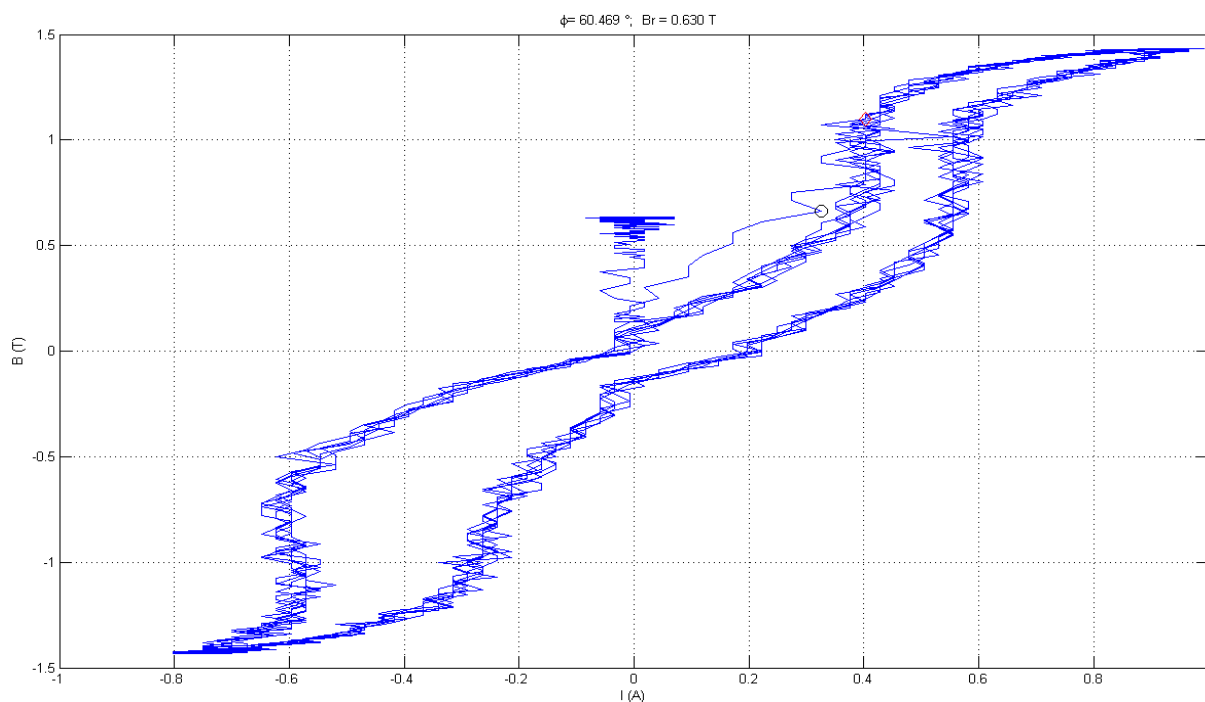


Obr. 49 - Naměřené průběhy Yd – vypnutí stykačem naprázdno

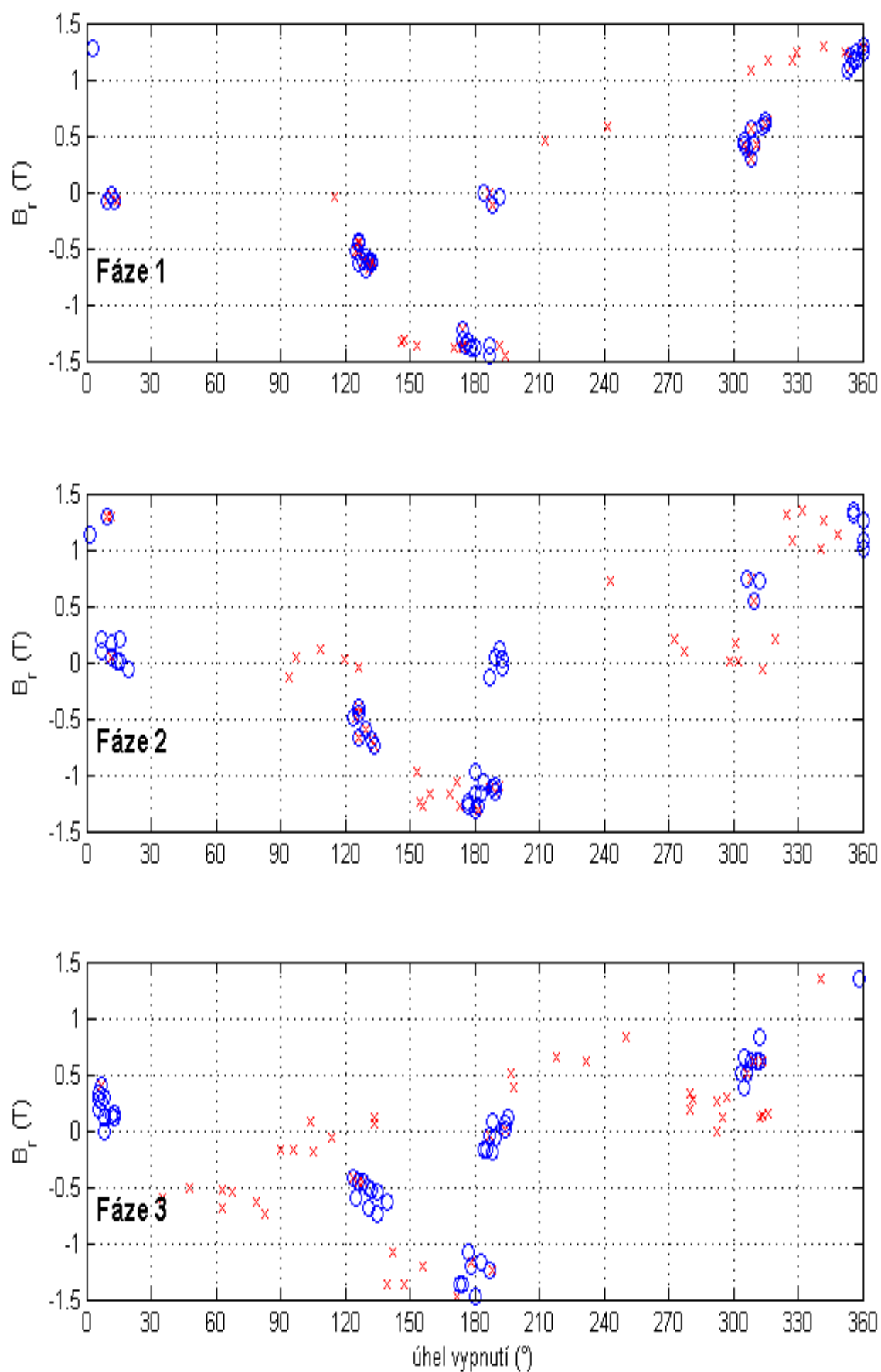


Obr. 50 - Příklad jedné fáze (Yd_0) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS

V průběhu v jedné fázi (Obr. 50) si lze opět všimnout skoku na křivce remanentní indukce, která vznikla dotací ze zbývajících vinutí. Hysterezní smyčka (Obr. 51) má skoro charakteristický tvar a je zde patrná remanentní indukce mimo tělo křivky.

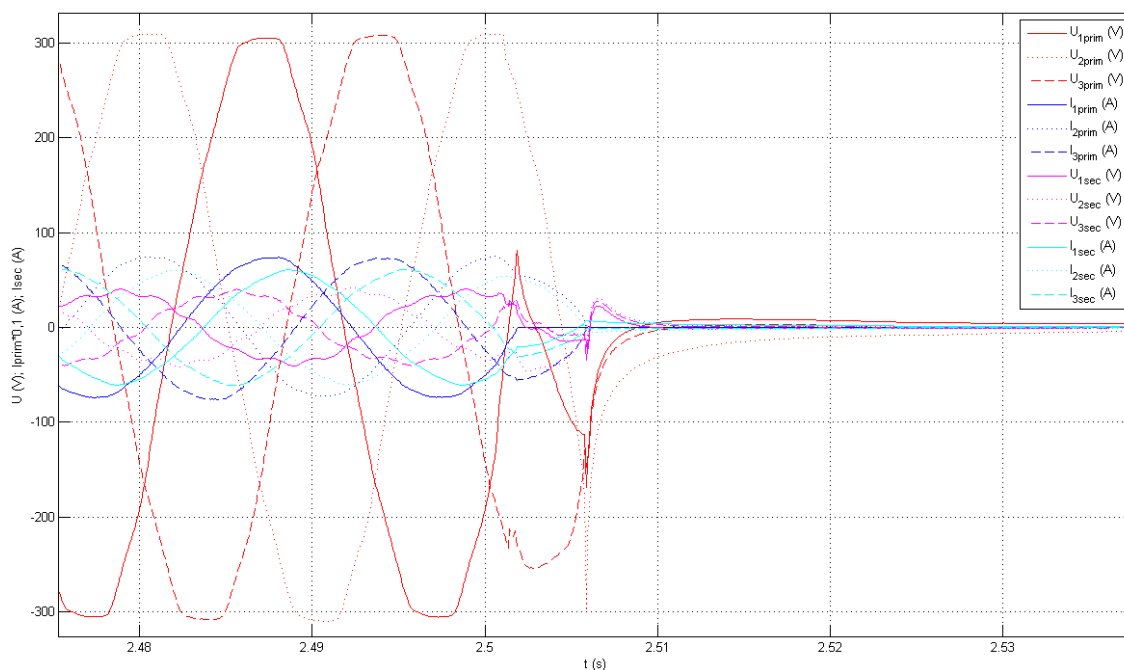


Obr. 51 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (Yd_0) (z průběhu výše)



Obr. 52 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Yd naprázdno

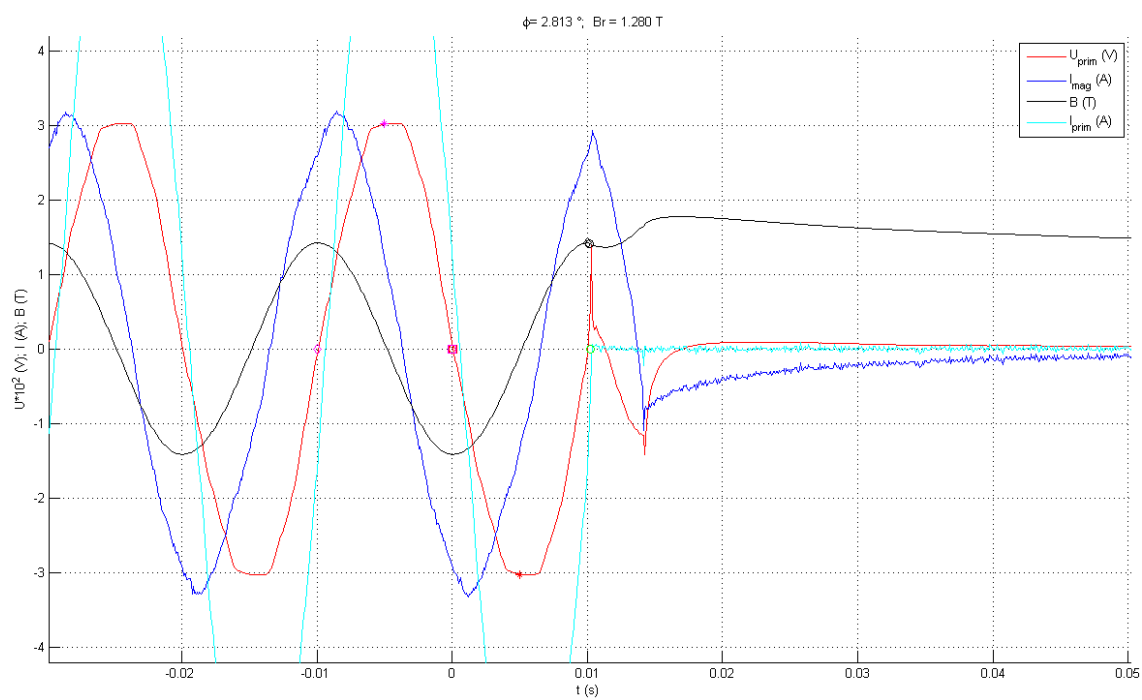
3.3.4.2. Vypnutí se zátěží



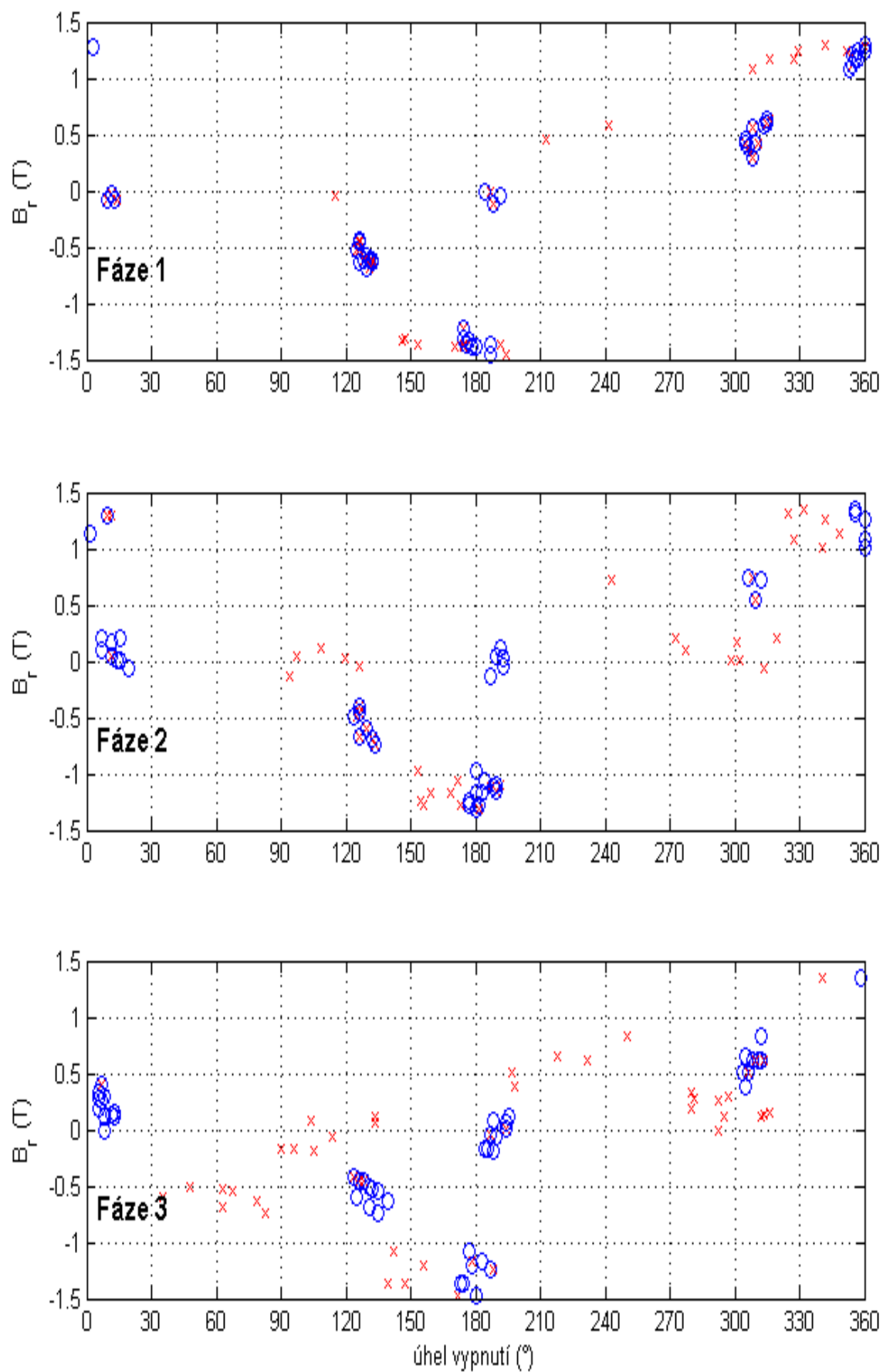
Obr. 53 - Naměřené průběhy Y_d – vypnutí stykačem se zátěží

Na průběhu na Obr. 54 stojí za povšimnutí to, že při rozepnutí transformátoru se na primárním napětí naindukovala nejprve kladná špička ovlivněná osadními vinutími a poté se naindukovala špička záporná, která vznikla již úplným rozpojením obvodu.

Vypínací mapy (Obr. 55) v tomto případě jsou téměř shodné, což je dáno skupinovým zapojením s tím, že docházelo ke shluku více bodů na jednotlivých místech.



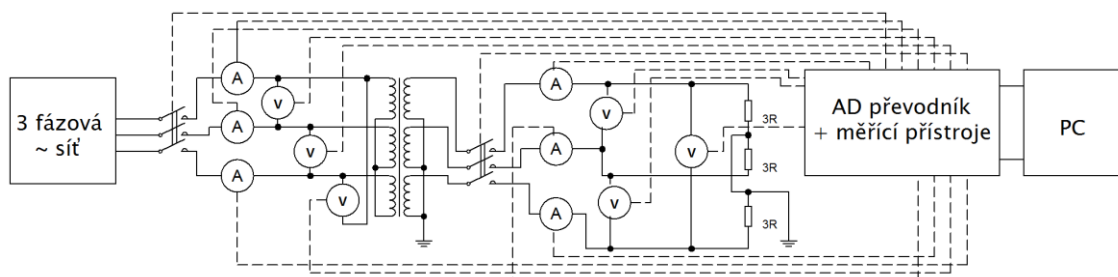
Obr. 54 - Příklad jedné fáze (Yd_R) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS



Obr. 55 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Yd se zátěží

3.3.5. Napájení z elektrické sítě – zapojení Yyn

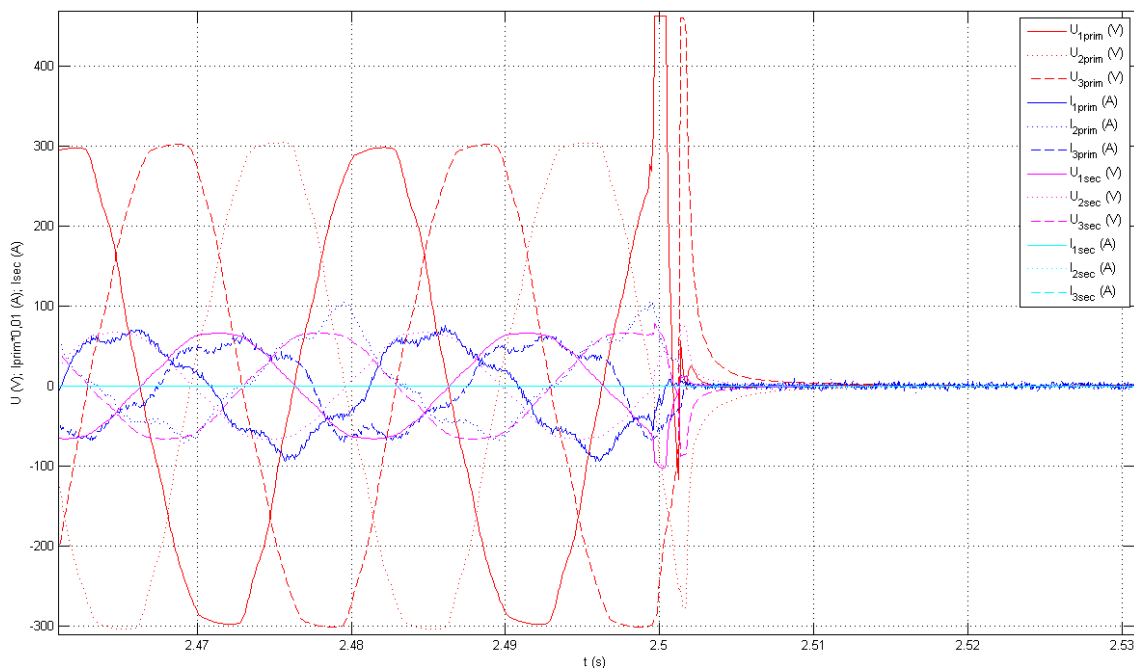
Primární vinutí transformátoru jsem zapojil do hvězdy bez vyvedeného středu a sekundární stranu vinutí jsem zapojil taktéž do hvězdy ale s vyvedeným středem.



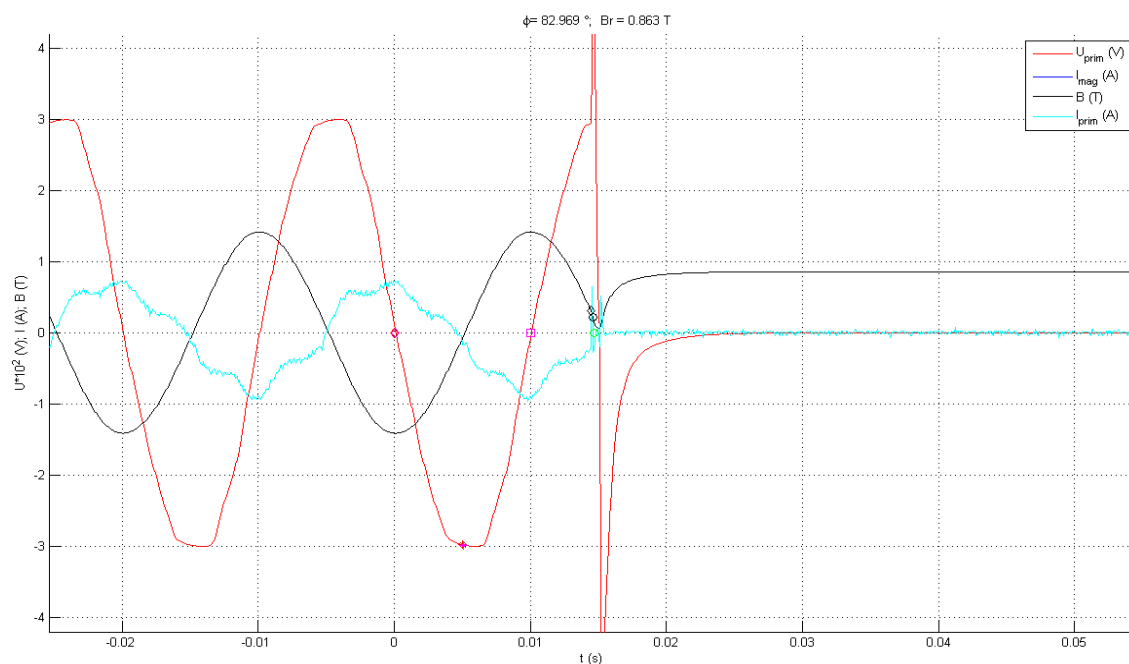
Obr. 56 - Schéma zapojení Yyn

3.3.5.1. Vypnutí naprázdno

Na průběhu měřených hodnot (Obr. 57) je velice patrná dvojitá špička na primárním napětí, která je způsobena více fázemi na stejném magnetickém obvodu s rozdílnou dobou vypnutí jednotlivých fází.

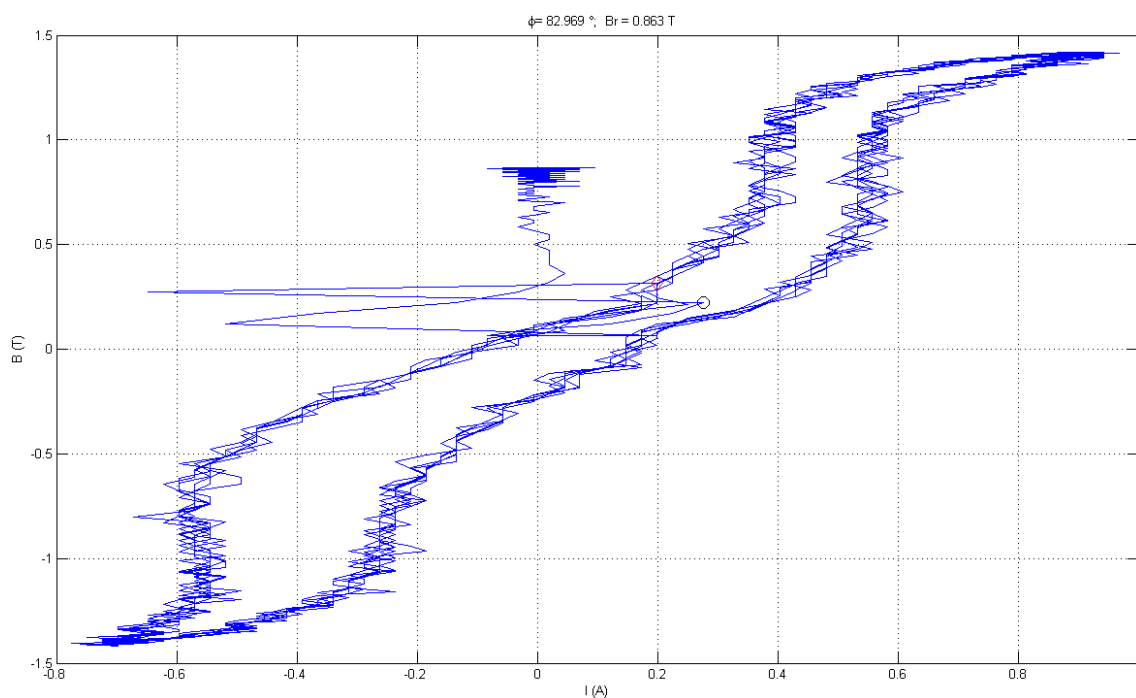


Obr. 57 - Naměřené průběhy Yyn – vypnutí stykačem naprázdno

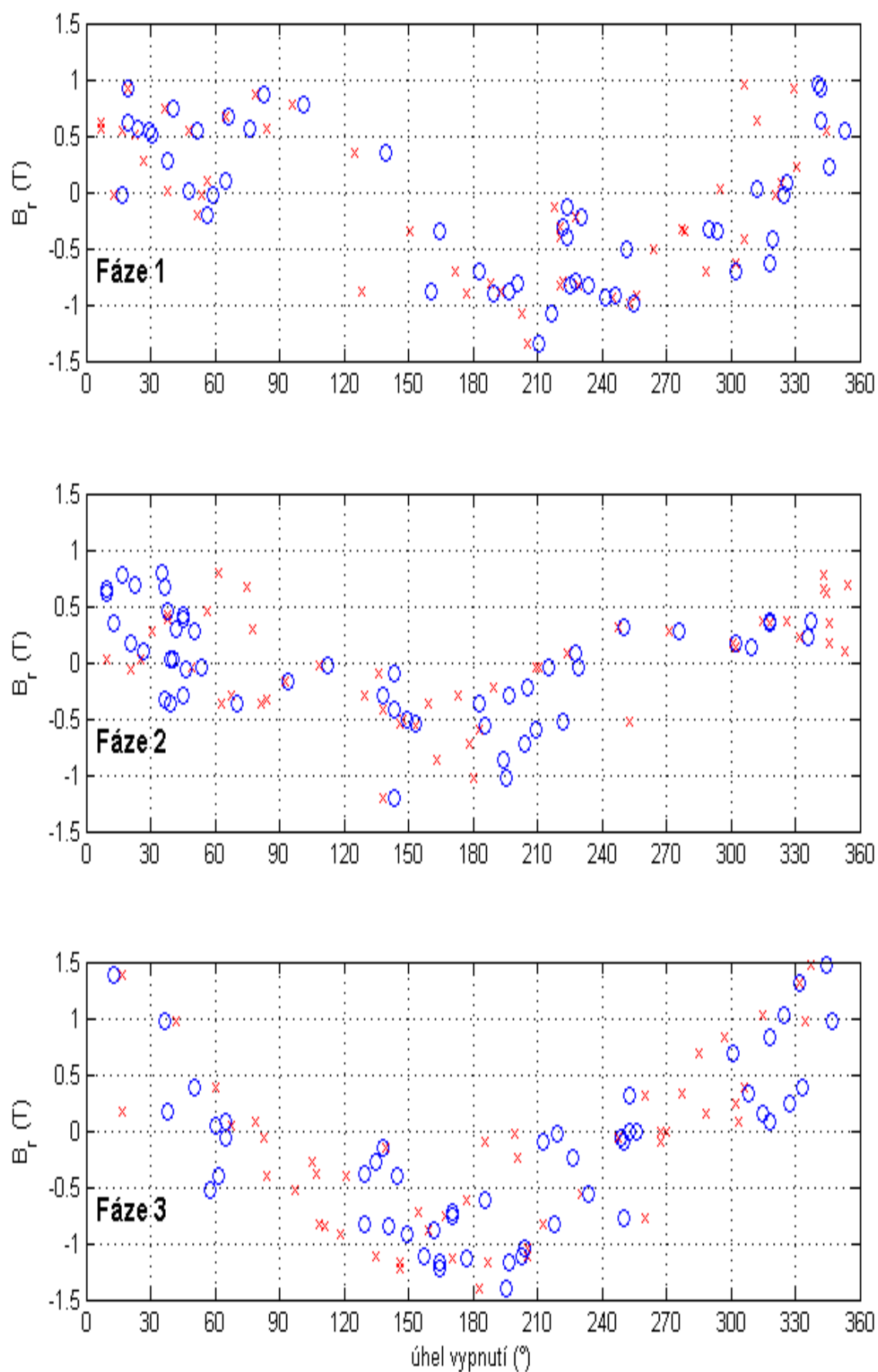


Obr. 58 - Příklad jedné fáze (Yyn_0) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS

Primární proud v jednotlivých fázích (Obr. 58) jeví typický čistý průběh transformátoru. Remanentní indukce opět vyskočila dotováním ostatními fázemi. Hysterezní smyčka (Obr. 59) má pravidelný tvar s remanentní indukcí mimo plochu vymezenou touto křivou.

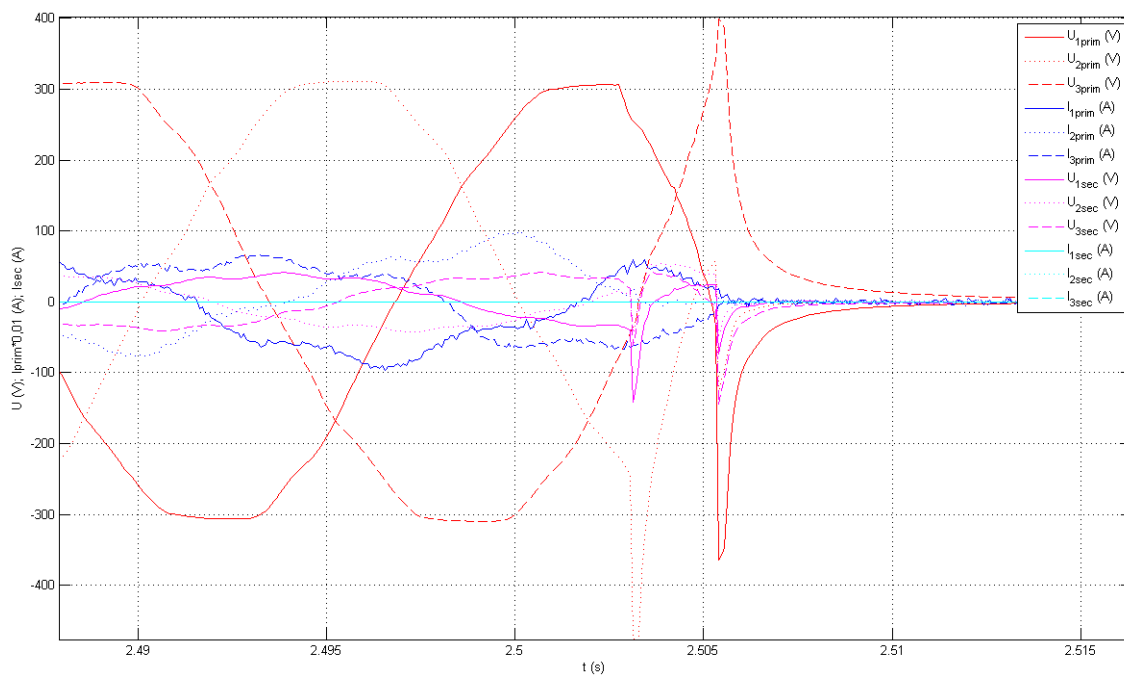


Obr. 59 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (Yyn_0) (z průběhu výše)

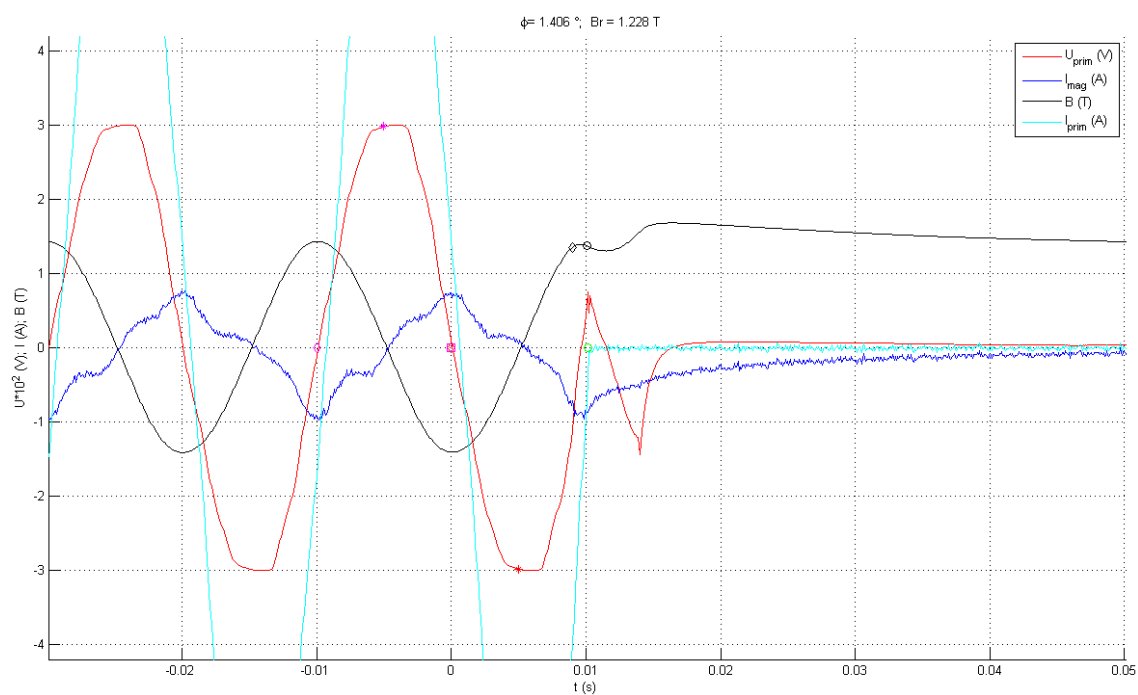


Obr. 60 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Yyn naprázdno

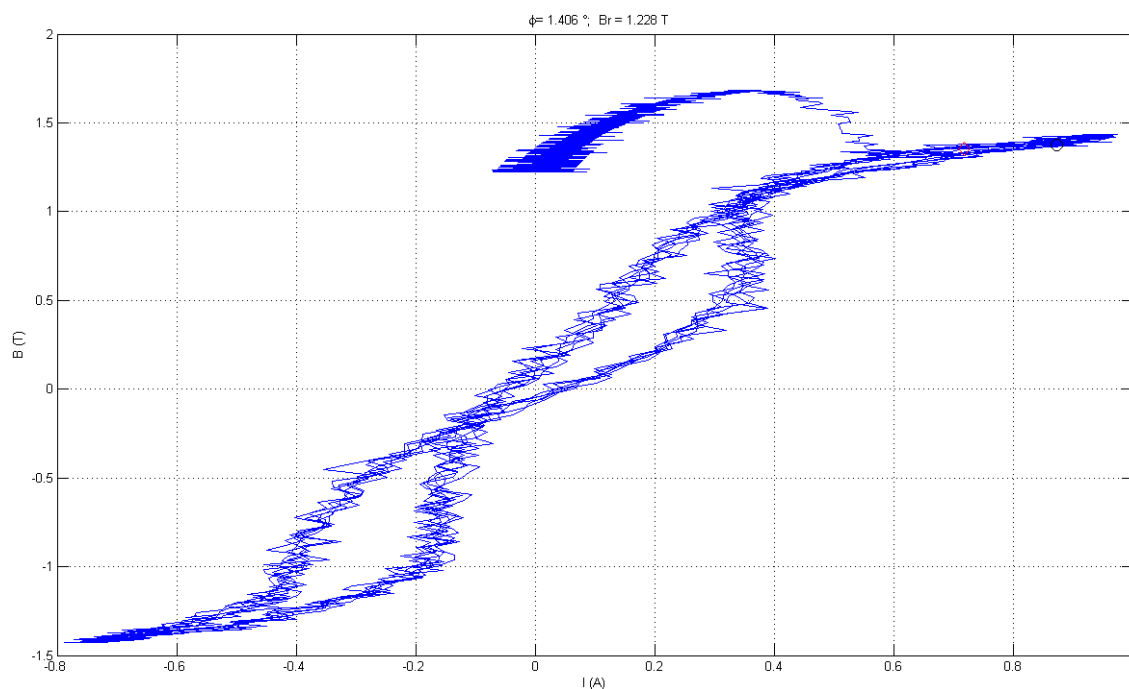
3.3.5.2. Vypnutí se zátěží



Obr. 61 - Naměřené průběhy Yyn – vypnutí stykačem se zátěží



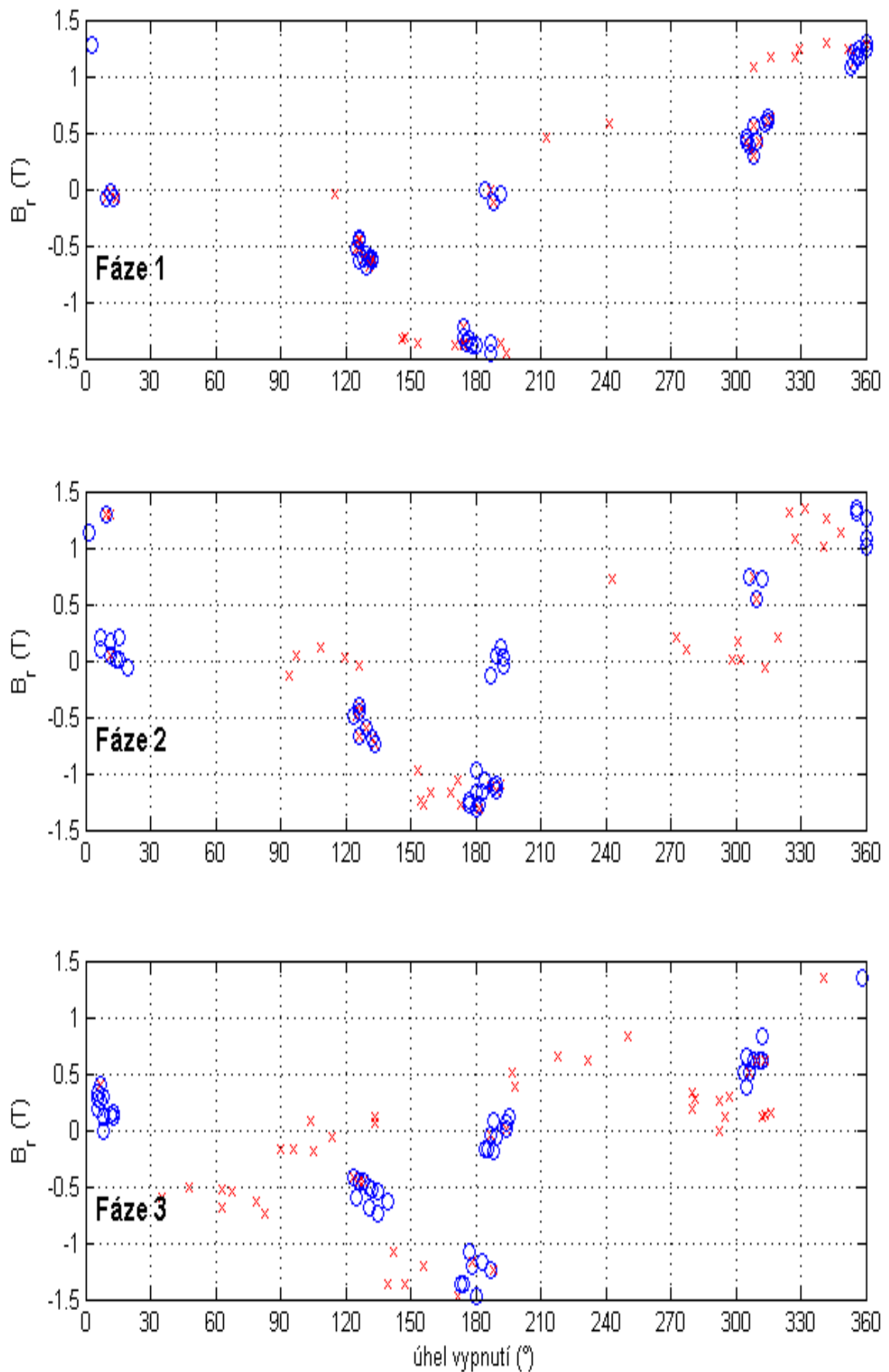
Obr. 62 - Příklad jedné fáze (Yyn_R) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS



Obr. 63 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (Yyn_R) (z průběhu výše)

V tomto zapojení s aktivní zátěží je hysterezní smyčka (Obr. 63) deformovaná s velkým překmitem remanentní indukce, která přesahuje hodnotu 1,5T a končí opět mimo tělo křivky.

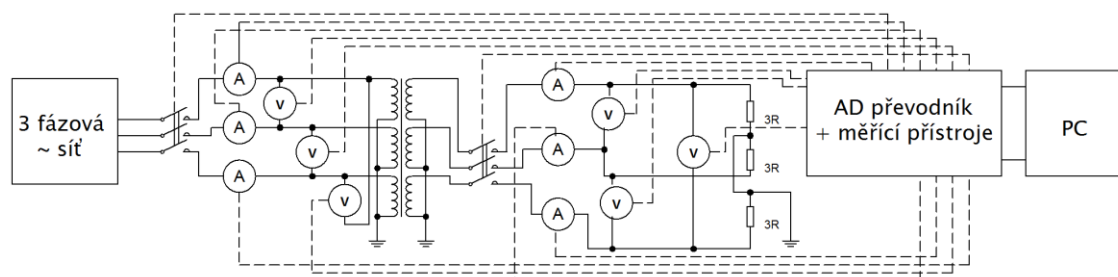
Jednotlivé fáze mají téměř totožnou charakteristiku vypínání (Obr. 64) bez jakýchkoli velkých odchylek, což je dáno skupinovým zapojením.



Obr. 64 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Yyn se zátěží

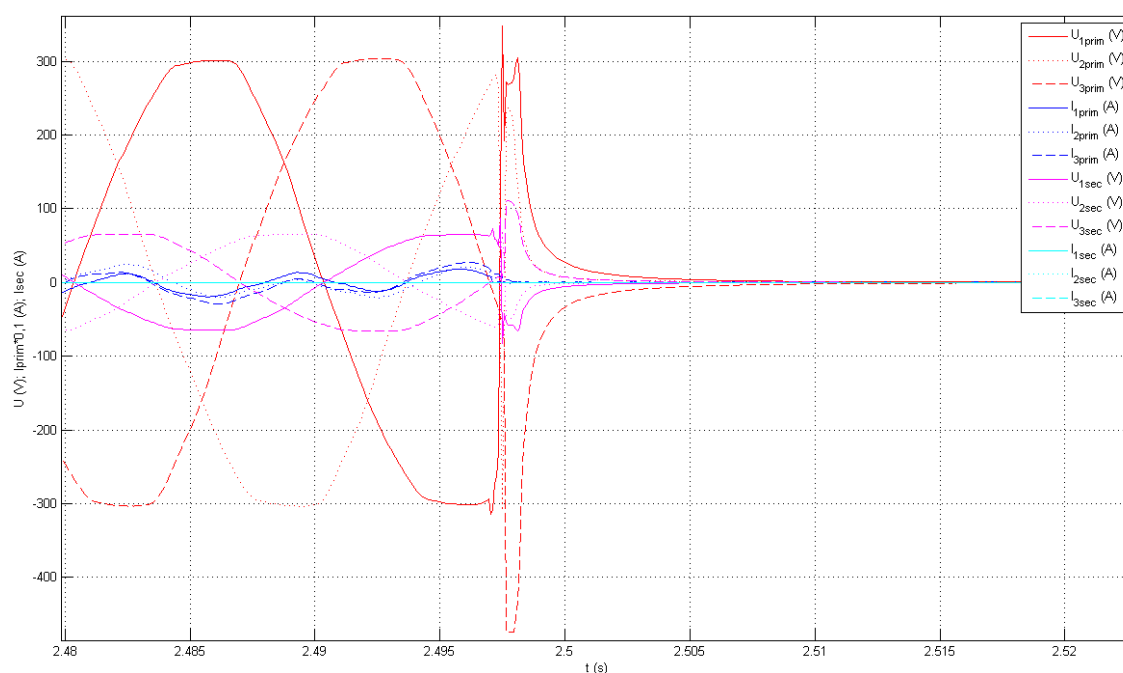
3.3.6. Napájení z elektrické sítě – zapojení YNyn

Posledním měřením bylo zapojení se souměrným skupinovým zapojením na obou stranách transformátoru. Obojí bylo zapojeno do hvězdy s vyvedeným středem (Obr. 65).

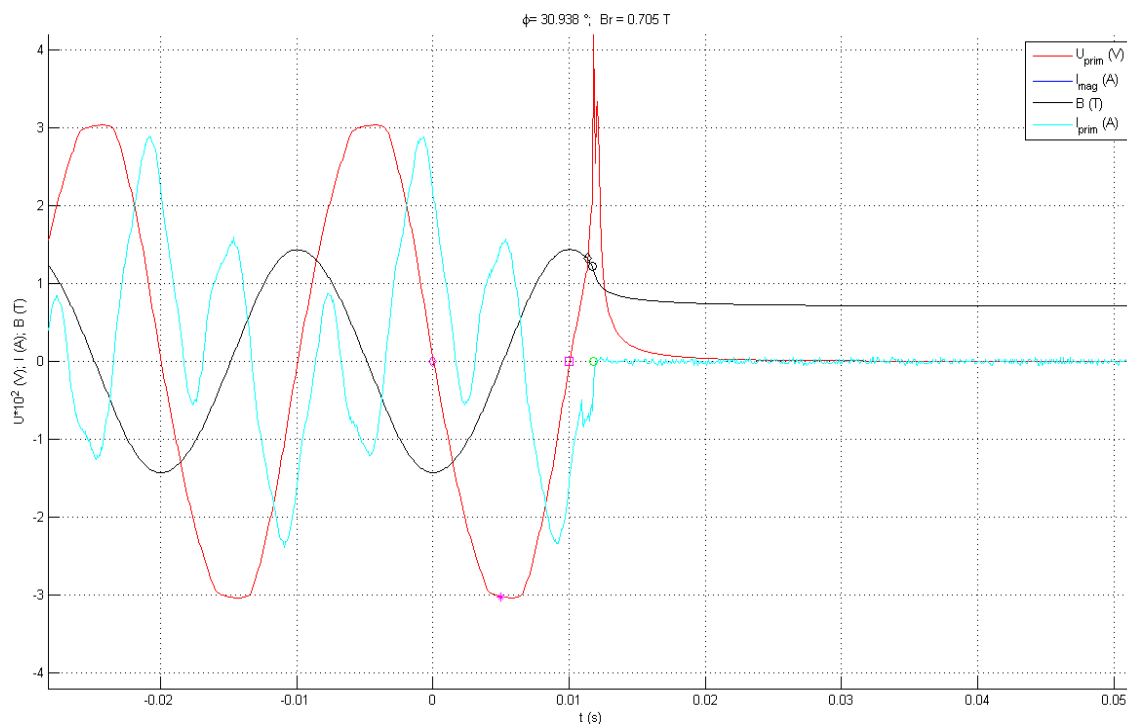


Obr. 65 - Schéma zapojení YNyn

3.3.6.1. Vypnutí naprázdno



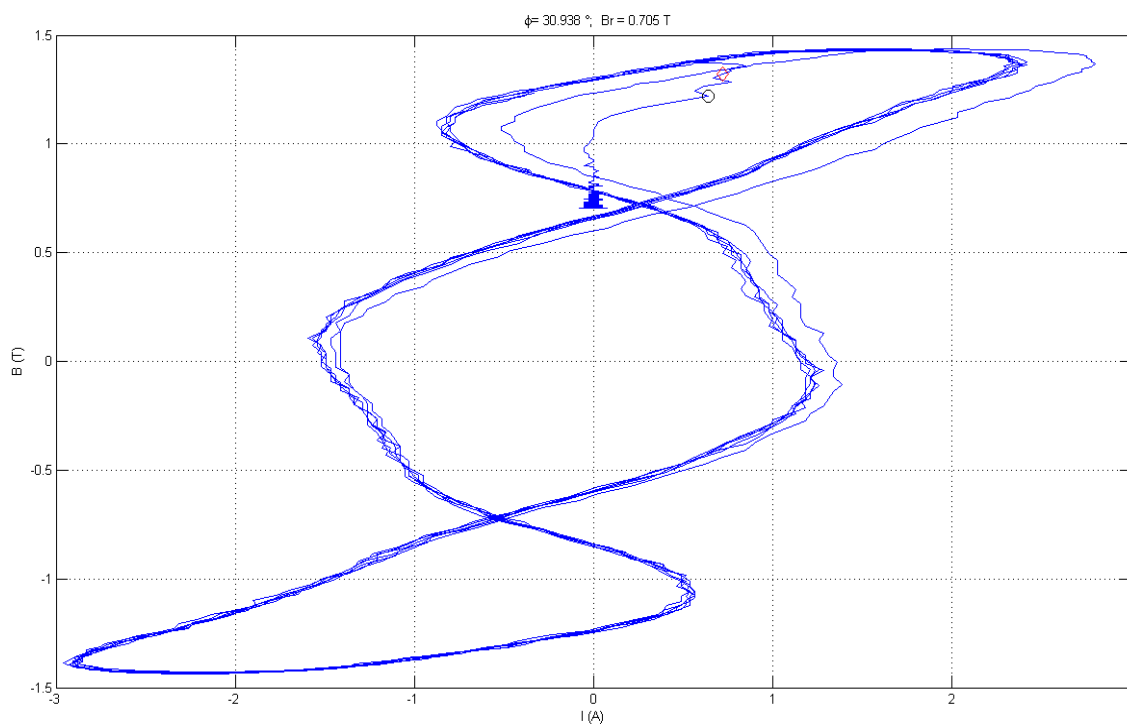
Obr. 66 - Naměřené průběhy YNyn – vypnutí stykačem naprázdno



Obr. 67 - Příklad jedné fáze (YNyn_0) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS

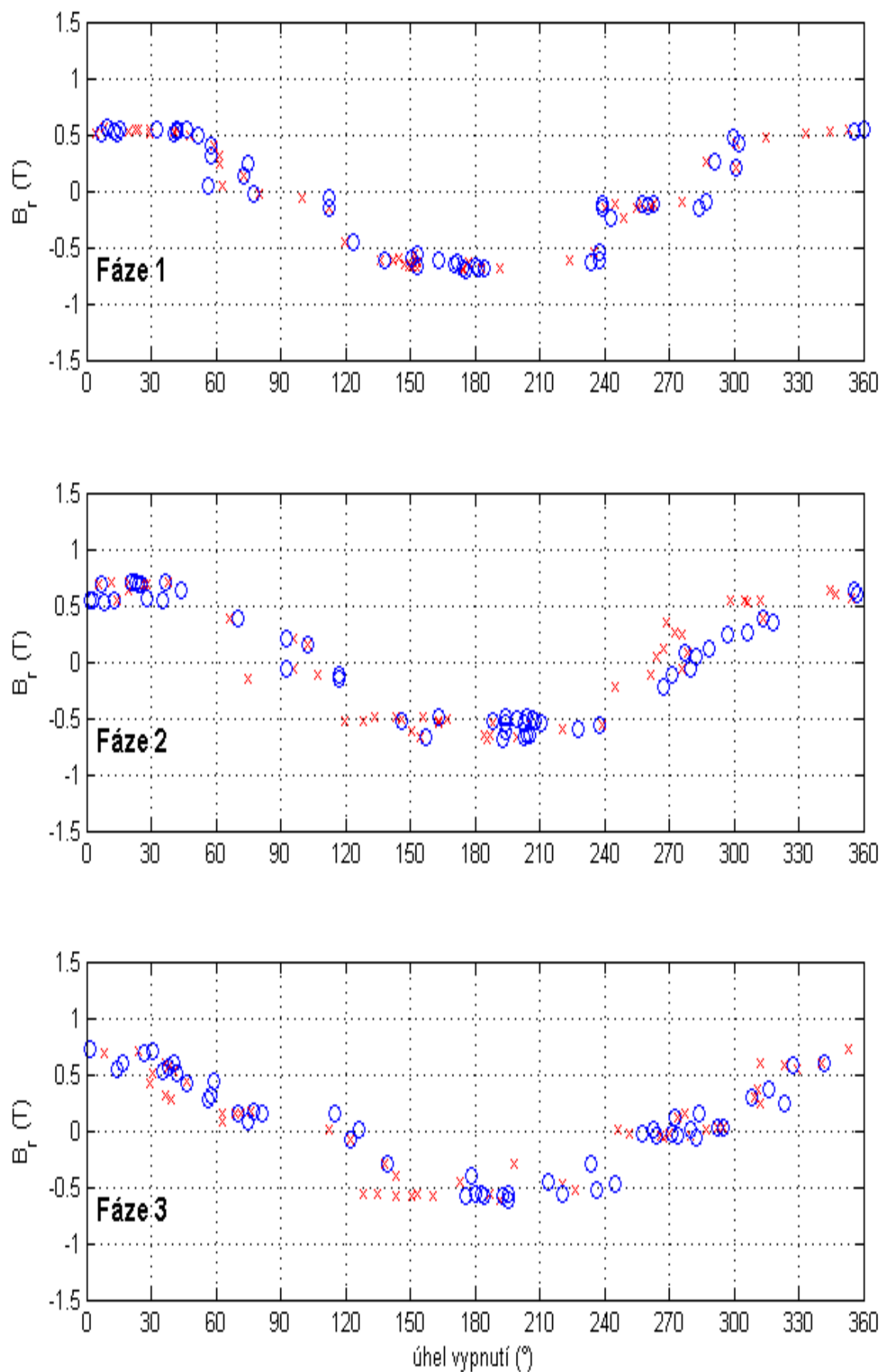
Obr. 67 hezky ukazuje charakteristický tvar proudové křivky v primárním vinutí, kde je patrná vysoká hodnota třetí harmonické proudu, což je dáno tím, že transformátor obsahuje 3 vinutí, která se vzájemně ovlivňují a ovlivňují tím i jednotlivé magnetizační proudy v jednotlivých vinutích.

Hysterezní smyčka je překroucená z důvodu vzájemného ovlivňování vinutí na společném magnetickém obvodu. Tvar v podstatě kopíruje kmity na 3. harmonické proudu.



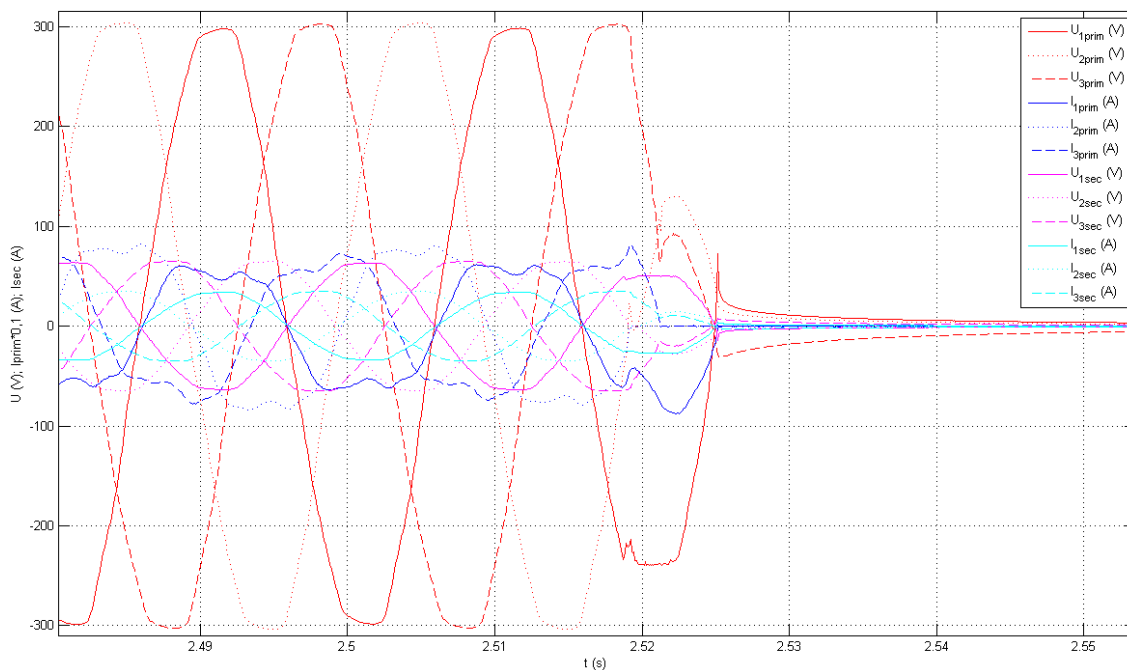
Obr. 68 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (YNyn_0) (z průběhu výše)

Mapa remanentní indukce v zapojení YNyn nejvíce odpovídá měření na jednofázovém transformátoru. Zajímavé je, že nejvyšší hodnoty remanentní indukce dosahují hodnoty jen 0,75 T.



Obr. 69 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení YNyn naprázdno

3.3.6.1. Vypnutí se zátěží

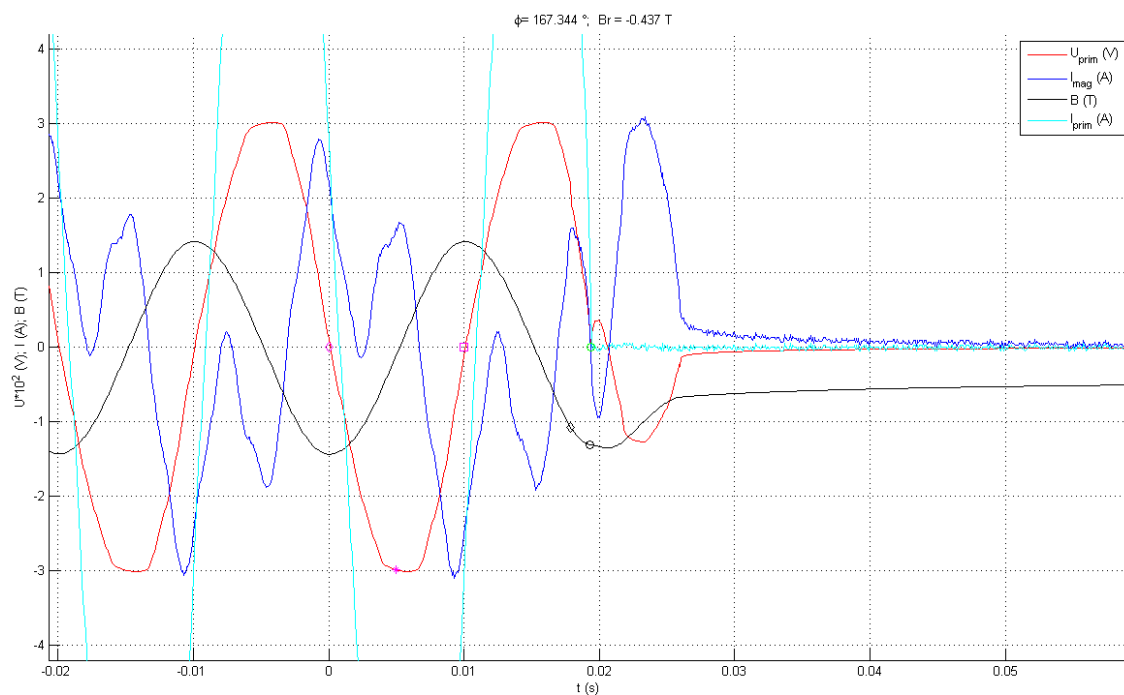


Obr. 70 - Naměřené průběhy YNyn – vypnutí stykačem se zátěží

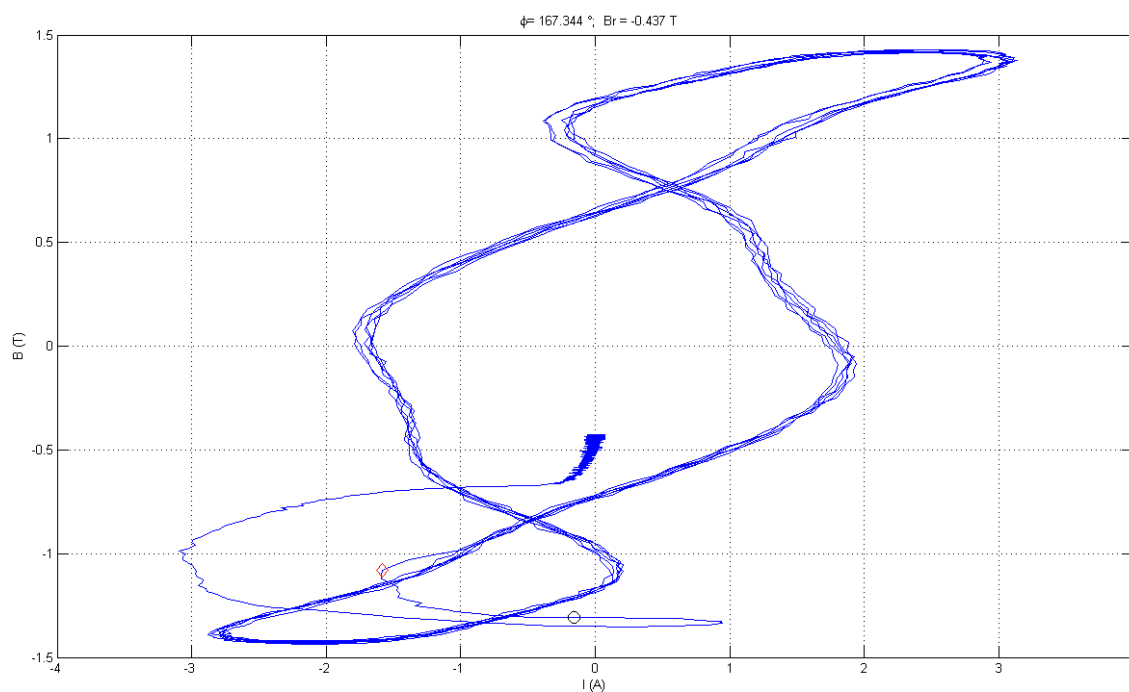
Naměřené průběhy (Obr. 70 a Obr. 71) se skoro neliší od zapojení bez zátěže (3.3.6.1). I zde vidíme charakteristický průběh primárního proudu.

Hysterezní smyčka (Obr. 72) je opět překroucená, ale s tím že v tomto dílčím měření se křivka remanentní indukce zastavila uvnitř těla hysterezní smyčky.

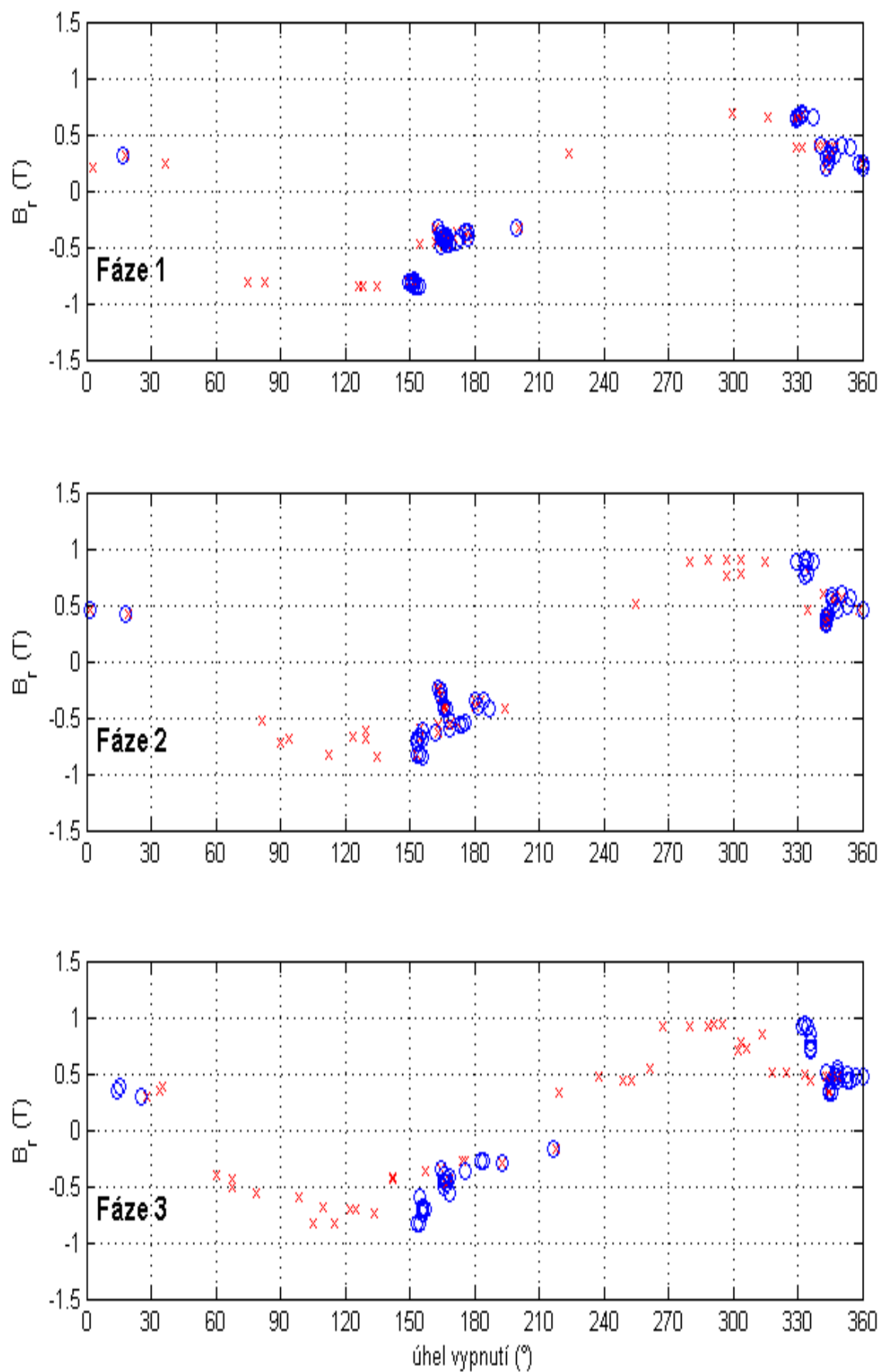
Mapa průběhů při vypínání (Obr. 73) se liší od zapojení naprázdno tím, že zde došlo ke shluku jednotlivých bodů na několika místech. Tato situace je způsobena hořením oblouku ve vypínajícím stykači, obdobně jako u případu s jednofázovým transformátorem. Maximální remanentní indukce byla až 1 T.



Obr. 71 - Příklad jedné fáze (YNyn_R) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS



Obr. 72 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (YNyn_R) (z průběhu výše)



Obr. 73 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení YNyn se zátěží

4. Závěr

V této bakalářské práci bylo cílem změřit vypínací charakteristiky pro třífázové transformátory. Účelem bylo zjištění remanentní indukce, které zbudou v jádře po vypnutí, a to pro jednotlivá skupinová zapojení vinutí. Dalším sledovanou proměnnou byl charakter zátěže připojené k transformátoru.

Tuto práci jsem si však rozšířil o předcházející měření s jednofázovým transformátorem, abych pochopil základní jevy a principy, které vznikají při vypínání transformátorů.

Z těchto měření jsem zjistil to, že se projevy některých typů připojené zátěže velice podobají, a tudíž je nemusíme v případě třífázového transformátoru již měřit a můžeme uvažovat tuto podobnost. Jmenovitě jsou to zapojení naprázdno, jak pro vypínání programovatelným zdrojem, tak i stykačem. Charakter zátěže s použitím usměrňovače odpovídá transformátoru naprázdno. Jako další se sobě podobá zatěžování odporovou a RL zátěží, důsledkem je jen mírný fázový posun uhašení oblouku.

Z těchto důvodů byla třífázová měření provedena pouze v zapojení naprázdno a s odporovou zátěží avšak pro různá skupinová zapojení. Z těch jsem si vybral 4 nejpoužívanější – Dyn, Yd, Yyn a YNyn. Tato zapojení jsem proměřil, vyhodnotil a vygeneroval jejich vypínací charakteristiky. Zajímavé je, že díky společnému magnetickému obvodu dosahují remanentní indukčnosti vysokých hodnot, odpovídajících pracovní indukci transformátoru 1.5 T. V některých skupinových zapojeních je největší hodnota remanentní indukce omezena, viz Tab. 1 s přehledem zjištěných maximálních hodnot remanentní indukce.

Tabulka největších hodnot remanentní indukce:

Skupinové zapojení	Zátěž na sekundárním vinutí	Remanentní indukce B_r [T]
Dyn	naprázdno	1,5
	se zátěží	1,5
YNyn	naprázdno	0,7
	se zátěží	0,8
Yd	naprázdno	1,5
	se zátěží	1,5
Yyn	naprázdno	1,4
	se zátěží	1,5

Tab. 1 – Tabulka s maximálními hodnotami remanentní indukce 3f trf

Zjištěné výsledky poslouží k další vědecké činnosti v problematice řízeního spínání transformátorů.

Použitá literatura

- [1] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 1, Úvod Transformátory* 3. dopil. vydání Praha Academia 1980.
- [2] NOVÝ, Jan, *Zapínací proud třífázového transformátoru*, Bakalářská práce, TUL Liberec 2007.
- [3] ČSN 35 1086 *Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem*. Praha: Vydavatelství norem, 1981.
- [4] NOVÁK, Miroslav, *Přechodový děj při zapnutí transformátoru – způsoby omezování zapínacího proudu*, Disertační práce, TUL Liberec 2003.
- [5] 29 Magnetické materiály. In 29 *Magnetické materiály* [online]. Praha 8 : [s.n.], 25.2.2008 [cit. 2011-01-7]. Dostupné z WWW: <<http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/29%20%20Magnetick%e9%20materi%e1ly.doc>>.
- [6] TUČEK, J., *Úvod do magnetismu, magnetické vlastnosti materiálů a magnetické jevy v nanosvětě*, Univerzita Palackého v Olomouci, 14. 4. 2010.
- [7] APOLONIO R., J. C. de Oliviera, H. S. Bronzeado and A. B. de Vasconcellos, *Transformer controlled switching: a strategy proposal and laboratory validation*, IEEE 2004, Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1409425>.
- [8] LUR'E, A. I. Transformer Connection Under No-Load and Short-Circuit Events. *Elektrotehnika* [online]. 2008, 2. Dostupný z: <<http://www.springerlink.com/content/v1335025l41r7854/fulltext.pdf>. ISSN 1068-3712>.
- [9] SVOBODA, E., et al. *Přehled středoškolské fyziky*. 3. Praha 4 : Prometheus, 2003. 500 s. ISBN 80-7196-116-7.
- [10] DUFEK, Milan; HRABÁK, Jaroslav; TRNKA, Zdeněk. *Magnetická měření*. Praha: SNTL, 1964. 402 s.
- [11] *Tugraz.at* [online]. Leden 2010 [cit. 2011-05-18]. Bloch wall. Dostupné z WWW: <<http://lamp.tu-graz.ac.at/~hadley/ss1/problems/heisenberg/Q.php>>.

- [12] NAUDIN, J.L. *JLN Labs* [online]. 30. 1. 2005 [cit. 2011-05-18]. The Barkhausen Effect experiment by Jean-Louis Naudin. Dostupné z WWW: <<http://jnaudin.free.fr/spgen/barkhausen.htm>>.
- [13] *Physic stack* [online]. 2010 [cit. 2011-05-18]. Úloha 741. Dostupné z WWW: <http://www.physicstasks.eu/uloha_471>.

Citace

- [14] 29 Magnetické materiály. In 29 *Magnetické materiály* [online]. Praha 8 : [s.n.], 25.2.2008 [cit. 2011-01-7]. Dostupné z WWW: <<http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/29%20%20%20Magnetick%e9%20materi%e1ly.doc>>.

Seznam obrázků

Obr. 1	- Diamagnetický materiál v magnetickém poli [5]	12
Obr. 2	- Paramagnetický materiál v magnetickém poli [5]	13
Obr. 3	- Princip Blochovy stěny [11].....	14
Obr. 4	- Weissovy domény (vektory) se znázorněnými Blochovými stěnami [12]	15
Obr. 5	- Hysterezní smyčka feromagnetického materiálu [5]	16
Obr. 6	- Princip magnetické indukce [13].....	18
Obr. 7	- Zobrazení remanentní indukce u hyst. smyčky.....	20
Obr. 8	- Zapojení ferrografů – a) otevřené i uzavřené vzorky, b) pouze uzavřené vzorky [10]	21
Obr. 9	- Verze měřicího obvodu s použitím RL a osciloskopu	21
Obr. 10	- Nová verze měřicího obvodu	23
Obr. 11	- Měřené veličiny a jejich průběhy s vyznačenými důležitými body	23
Obr. 12	- Měřená hysterezní křivka.....	25
Obr. 13	- Detail remanentní indukce na hysterezní křivce po vypnutí	26
Obr. 14	- Blokové schéma měřicího obvodu	27
Obr. 15	- Zapojení pro zapojení naprázdno s rozepnutím zdrojem	28
Obr. 16	- Naměřené průběhy – vypnutí zdrojem naprázdno.....	28
Obr. 17	- Hysterezní smyčka – vypnutí zdrojem naprázdno	29
Obr. 18	- Vypínací mapa pro vypnutí pomocí zdroje naprázdno	30
Obr. 19	- Zapojení pro zapojení naprázdno s rozepnutím stykačem	31
Obr. 20	- Naměřené průběhy – vypnutí stykačem naprázdno.....	31
Obr. 21	- Hysterezní smyčka – vypnutí stykačem naprázdno	32
Obr. 22	- Vypínací mapa pro vypnutí pomocí stykače naprázdno	32
Obr. 23	- Zapojení pro zapojení naprázdno s rozepnutím stykačem a odporovou zátěží	33
Obr. 24	- Naměřené průběhy – vypnutí stykačem + R zátěž	34
Obr. 25	- Hysterezní smyčka – vypnutí stykačem + R zátěž	34
Obr. 26	- Vypínací mapa pro vypnutí pomocí stykače s přidanou R zátěží.....	35
Obr. 27	- Zapojení pro zapojení naprázdno s rozepnutím stykačem a RL zátěží	36
Obr. 28	- Naměřené průběhy – vypnutí stykačem + RL zátěž	36

Obr. 29 - Hysterezní smyčka – vypnutí stykačem + RL zátěž	37
Obr. 30 - Vypínací mapa pro vypnutí pomocí stykače s přidanou RL zátěží	38
Obr. 31 - Zapojení pro zapojení s usměrňovačem a rozepnutím stykačem	38
Obr. 32 - Naměřené průběhy – vypnutí stykačem + usměrňovač	39
Obr. 33 - Hysterezní smyčka – vypnutí stykačem + usměrňovač.....	40
Obr. 34 - Vypínací mapa pro vypnutí pomocí stykače s můstkovým usměrňovačem	41
Obr. 35 - Naměřené průběhy na 3f transformátoru i s jevy při zapnutí (připnutí k .. síti)	42
Obr. 36 - Naměřené průběhy YNy – vypnutí zdrojem naprázdno	44
Obr. 37 - Naměřené průběhy YNy – vypnutí zdrojem se zátěží.....	44
Obr. 38 - Naměřené průběhy YNyn – vypnutí zdrojem naprázdno	45
Obr. 39 - Naměřené průběhy YNyn – vypnutí zdrojem se zátěží.....	45
Obr. 40 - Schéma zapojení Dyn	46
Obr. 41 - Naměřené průběhy Dyn – vypnutí stykačem naprázdno	47
Obr. 42 - Příklad jedné fáze (Dyn_0) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS.....	48
Obr. 43 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (Dyn_0) (z průběhu výše)	49
Obr. 44 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Dyn naprázdno.....	50
Obr. 45 - Naměřené průběhy Dyn – vypnutí stykačem se zátěží.....	51
Obr. 46 - Příklad jedné fáze (Dyn_R) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS.....	52
Obr. 47 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Dyn se zátěží	53
Obr. 48 - Schéma zapojení Yd	54
Obr. 49 - Naměřené průběhy Yd – vypnutí stykačem naprázdno.....	54
Obr. 50 - Příklad jedné fáze (Yd_0) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS	55
Obr. 51 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (Yd_0) (z průběhu výše).....	55
Obr. 52 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Yd naprázdno	56
Obr. 53 - Naměřené průběhy Yd – vypnutí stykačem se zátěží	57
Obr. 54 - Příklad jedné fáze (Yd_R) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS.....	58
Obr. 55 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Yd se zátěží	59
Obr. 56 - Schéma zapojení Yyn.....	60
Obr. 57 - Naměřené průběhy Yyn – vypnutí stykačem naprázdno	60
Obr. 58 - Příklad jedné fáze (Yyn_0) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS	61

Obr. 59 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (Yyn_0) (z průběhu výše)	61
Obr. 60 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Yyn naprázdno	62
Obr. 61 - Naměřené průběhy Yyn – vypnutí stykačem se zátěží	63
Obr. 62 - Příklad jedné fáze (Yyn_R) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS	63
Obr. 63 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (Yyn_R) (z průběhu výše)	64
Obr. 64 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení Yyn se zátěží	65
Obr. 65 - Schéma zapojení YNyn	66
Obr. 66 - Naměřené průběhy YNyn – vypnutí stykačem naprázdno	66
Obr. 67 - Příklad jedné fáze (YNyn_0) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS	67
Obr. 68 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (YNyn_0) (z průběhu výše)	68
Obr. 69 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení YNyn naprázdno	69
Obr. 70 - Naměřené průběhy YNyn – vypnutí stykačem se zátěží	70
Obr. 71 - Příklad jedné fáze (YNyn_R) – naměřené a vypočtené hodnoty pro HS	71
Obr. 72 - Příklad hysterezní smyčky pro jednu fázi (YNyn_R) (z průběhu výše)	71
Obr. 73 - Vypínací mapa pro 3f trf v zapojení YNyn se zátěží	72

Obsah přiloženého DVD

